



Telmo Santos Cruz

**ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO DE OBRAS LONGITUDINAIS
ADERENTES**



Telmo Santos Cruz

**ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO DE OBRAS LONGITUDINAIS
ADERENTES**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Peter Cornelis Roebeling, Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rui Pires de Matos Taborda

Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, a todas as pessoas que me acompanharam e ajudaram durante o meu percurso académico, ficam aqui algumas palavras de agradecimento.

Aos meus pais pelo seu apoio incondicional e principalmente, pela oportunidade que me deram de poder alcançar esta meta... À minha irmã, pela paciência, incentivo e confiança ao longo destes anos. À restante família pela companhia e apoio sempre que necessário.

Ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, por toda a ajuda, partilha de conhecimentos e orientação académica, pela disponibilidade, incentivo e acompanhamento incessante durante a realização deste trabalho, e acima de tudo, pelas oportunidades proporcionadas.

Ao meu coorientador, Doutor Peter Roebeling, pelas sugestões e revisões efetuadas e pela ajuda e partilha de conhecimentos na área da análise custo-benefício.

À Câmara Municipal de Ovar, pelo tempo disponibilizado pelo Sr. Paulo Silva e por toda a informação cedida no início deste trabalho.

À Carla Pereira, pela ajuda prestada na criação da grelha altimétrica do LTC.

Ao Sr. Fernando Graça, pela amabilidade, disponibilidade e prontidão na partilha de registos de dano em Ovar.

À Bárbara Marinho, pela disponibilização de dados de agitação marítima.

Ao Vidal, Pina, Fred, Dias, Silvério, Diogo, Regina, Chica, Eurico e Guimas pela amizade, companheirismo e momentos bem passados... A todos os meus colegas sempre presentes no departamento, pela companhia nos longos dias de trabalho e por todos os momentos de descontração.

A todos, um muito obrigado!

palavras-chave

Obras longitudinais aderentes, galgamentos, perfil de praia, linha de costa, modelação numérica, custo-benefício.

resumo

Diversas ações antropogénicas têm enfraquecido o caudal sólido afluente ao litoral, reduzindo a alimentação de sedimentos nas praias e conduzindo a um recorrente e generalizado recuo da posição da linha de costa. Perante este cenário, diferentes alternativas de intervenção de defesa costeira têm sido efetuadas em zonas de maior sensibilidade, sendo uma das mais frequentes, a construção de obras longitudinais aderentes. No entanto, a falta de monitorização destas estruturas, conjugada com o agravamento do grau de exposição das frentes costeiras urbanizadas à erosão, têm conduzido a um aumento da frequência de ocorrência de danos em diversas localidades, não só nas próprias estruturas, mas também nas zonas marginais às obras aderentes (infraestruturas, estabelecimentos comerciais e habitações).

No âmbito deste trabalho, o estudo dos diversos fenómenos de propagação de ondas possibilitou a obtenção das características de agitação marítima locais, o que, juntamente com a análise do espraio das ondas, permitiu a avaliação do limite máximo de espraio em estruturas de defesa costeira. Foi desenvolvida uma metodologia de cálculo para estimar a frequência de galgamentos de obras longitudinais aderentes, em função da profundidade de fundo à frente da obra e do desnível entre a cota de coroamento e o nível médio do mar. Tendo em conta que o clima de agitação marítima e o comportamento do perfil de praia estão intrinsecamente associados à evolução da frequência de galgamentos ao longo do tempo, identificaram-se os fatores que conduzem a uma tendência de abaixamento do perfil de praia. Analisaram-se diversas formulações para estimar a profundidade máxima de erosão, permitindo antecipar o aumento da frequência dos eventos de dano e dos custos associados ao longo do tempo. Face a este problema, estimaram-se as frequências de galgamento no caso de estudo (praia do Furadouro) e avaliou-se a eficiência de várias abordagens de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos existente (aumento da cota de coroamento, alimentação artificial do perfil de praia e construção de um patamar intermédio no talude da obra). Para tal, procedeu-se a uma análise custo-benefício das diversas soluções de intervenção, tendo em conta os custos de reabilitação das obras, os encargos de limpeza da via pública e reparação de infraestruturas e os danos devido às inundações.

Por outro lado, é fulcral avaliar os custos diretos e indiretos da construção e manutenção de obras aderentes comparativamente ao valor económico, social e histórico do património que protegem. Para isso, com o auxílio do modelo numérico LTC, foi simulada a evolução da posição da linha de costa para vários cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro para fazer face ao problema da erosão. Novamente, procedeu-se a uma análise custo-benefício de forma a estudar a viabilidade económica da construção destas estruturas para fazer face ao recuo da linha de costa.

keywords

Longitudinal revetments, overtopping, beach profile, shoreline, numerical modeling, cost-benefit.

abstract

Several anthropogenic actions have been weakening the sediment supplies to the coastal zones, reducing the amount of sediments available on the beaches and leading to a general and recurrent retreat of the shoreline position. Given this scenario, different coastal defence interventions, oftentimes longitudinal revetments, have been made in the past decades in certain areas with high erosion rates. However, the lack of monitoring of these coastal defence structures, combined with the degree of exposure of the urban areas to erosion, have led to an increased frequency of damage events in several locations, not only on the rubble mound revetments, but also in the marginal areas (damaging infrastructures, commercial establishments and housing).

The study of wave propagation phenomena allows the prediction of the local wave characteristics, which, along with the analysis of the wave induced setup, enables the evaluation of the maximum run-up heights. A calculation methodology was developed in order to assess the overtopping frequency of longitudinal revetments, depending on the bottom depth at the toe of the structure and on the height difference between the mean water level and the crown level. Given that the wave climate and the beach profile are intrinsically associated with the evolution of the overtopping frequency over time, the causes for the lowering of the beach profile were identified and various formulations were analysed in order to estimate the maximum scour depth, to anticipate the frequency of damage events and the evolution of flood costs over time. Due to this problem, an estimative of overtopping and flooding events was applied to a case study (Furadouro beach) to evaluate the effectiveness of different intervention pathways to reduce wave overtopping (crown elevation, artificial beach nourishment and construction of an intermediate berm). A cost-benefit analysis was performed to assess the economic viability of each scenario based on the rehabilitation costs of the revetments and the flood damage costs over time (assessment of damaged property and buildings, cleaning up marginal areas and repairing infrastructures).

Moreover, it is crucial to evaluate if the direct and indirect costs of construction and maintenance of longitudinal revetments compared with to the economic, social and historical value of the protected areas. Therefore, the numerical model LTC was used to simulate the shoreline evolution for different scenarios of increasing the extension of the longitudinal revetment located south of Furadouro. The economic viability of the construction of these coastal defence structures to prevent erosion was evaluated using a cost-benefit analysis taking into consideration the construction and maintenance costs of longitudinal revetments, the numerical modeling results for each scenario, the land cover values and the real estate values of urban areas.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do problema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia e estrutura da dissertação	3
2. Obras Longitudinais Aderentes	9
2.1. Caracterização da solução estrutural	9
2.1.1. Perfil transversal	9
2.1.1.1. Fundação	10
2.1.1.2. Núcleo	11
2.1.1.3. Camadas constituintes	11
2.1.1.4. Patamares intermédios	12
2.1.1.5. Rampas de acesso	12
2.1.1.6. Coroamento	13
2.1.2. Geometria em planta	13
2.1.3. Materiais constituintes	14
2.2. Estabilidade estrutural e impactes no perfil de praia	15
2.2.1. Erosão no perfil de praia	15
2.2.2. Subescavações	15
2.2.3. Galgamentos	17
2.2.4. Escoamentos no tardo	17
2.2.5. Assentamentos	18
2.2.6. Erosão a sotamar	18
2.3. Manutenção e monitorização	19
3. Galgamentos	23
3.1. Fenómenos de propagação de ondas	23
3.1.1. Empolamento	23
3.1.2. Refração	24
3.1.3. Altura de onda incidente	27
3.2. Espraçamento	28
3.3. Galgamentos	28

4. Evolução do Perfil de Praia	37
4.1. Causas do abaixamento do perfil de praia	37
4.2. Metodologias de cálculo	38
4.2.1. Song e Schiller (1973)	38
4.2.2. Jones (1975)	39
4.2.3. Xie (1981, 1985)/Sumer e Fredsøe (2000)	40
4.2.4. CERC (1984)	41
4.2.5. Hughes e Fowler (1991)	42
4.2.6. Fowler (1992)	43
4.2.7. Powell e Lowe (1994)	44
4.2.8. McDougal <i>et al.</i> (1996)	45
4.2.9. Powell e Whitehouse (1998)	46
4.2.10. O'Donoghue (2001)	48
4.3. Análises de sensibilidade	48
4.3.1. CERC (1984)	49
4.3.2. Hughes e Fowler (1991)	50
4.3.3. Fowler (1992)	51
4.3.4. McDougal <i>et al.</i> (1996)	52
4.3.5. Powell e Whitehouse (1998)	53
4.4. Análise estatística	54
4.5. Distância à profundidade máxima erodida	58
4.5.1. Herbich e Ko (1968)	58
4.5.2. Conclusão	59
5. Caso de Estudo	63
5.1. Enquadramento geográfico	63
5.2. Agitação marítima	63
5.3. Obras de defesa costeira existentes	67
5.4. Causas da erosão costeira	68
5.5. Eventos de dano devido à ação marítima	69
5.5.1. Base de dados	69
5.5.2. Estimativa da frequência de galgamento	70
5.5.2.1. Frequência atual de galgamentos	71
5.5.2.2. Evolução da frequência de galgamentos	72

5.5.3. Estimativa de custos	73
5.6. Intervenções de defesa costeira	74
5.6.1. Base de dados	74
5.6.2. Custos de intervenção	76
6. Intervenções para Reduzir Galgamentos	81
6.1. Aumento da cota de coroamento	81
6.1.1. Estimativa de custo	82
6.1.2. Aplicação ao caso de estudo	82
6.2. Alimentação artificial do perfil de praia	82
6.2.1. Estimativa de custo	84
6.2.2. Aplicação ao caso de estudo	85
6.3. Construção de um patamar intermédio	86
6.3.1. Estimativa de custo	90
6.3.2. Aplicação ao caso de estudo	90
7. Evolução da Posição da Linha de Costa	93
7.1. Posição da linha de costa	93
7.2. Taxas de recuo	95
7.3. Modelação numérica com o LTC	96
7.3.1. Descrição do modelo numérico	96
7.3.2. Análises de sensibilidade	98
7.3.3. Cenários de prolongamento de obras longitudinais aderentes	101
8. Análise Custo-Benefício	107
8.1. Metodologia	107
8.2. Intervenções para reduzir galgamentos	108
8.2.1. Cenários e pressupostos	108
8.2.2. Resultados	110
8.2.3. Análise crítica	112
8.3. Prolongamento de obras longitudinais aderentes	113
8.3.1. Cenários e pressupostos	113
8.3.2. Resultados	115
8.3.3. Análise crítica	118

9. Considerações Finais	123
9.1. Conclusões	123
9.2. Desenvolvimentos futuros	127
Referências Bibliográficas	133
Anexo A – Base de dados de eventos de dano	143
Anexo B – Base de dados de intervenções	151
Anexo C – Áreas afetadas por galgamentos na zona urbana do Furadouro	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil tipo da fundação de uma obra longitudinal aderente em estrato rochoso (adaptado de Lima, 2011, baseado em CIRIA <i>et al.</i> , 2007a).	10
Figura 2 – Tipologias de fundação aconselhadas para diferentes graus de erodibilidade do perfil de praia (adaptado de CIRIA <i>et al.</i> , 2007a).	11
Figura 3 – Esquema do perfil de obras longitudinais aderentes (Lima, 2011, baseado em Fleming <i>et al.</i> , 1998).	11
Figura 4 – Obra longitudinal aderente de Cortegaça com dois patamares intermédios (CMO, 2014).	12
Figura 5 – Exemplos de rampas de acesso à praia existentes no litoral de Ovar (CMO, 2014).	13
Figura 6 – Exemplos de tipologias de superestruturas em obras longitudinais aderentes (CMO, 2014).	13
Figura 7 – Exemplo de obras de defesa costeira complementares.	14
Figura 8 – Esquema da rotura típica da fundação de uma obra longitudinal aderente devido a subscavações (Lima, 2011, baseado em CIRIA <i>et al.</i> , 2007a).	16
Figura 9 – Roturas da obra longitudinal aderente central do Furadouro devido a subscavações, após intempéries dos anos de 2013 e 2014 (CMO, 2014).	16
Figura 10 – Registos fotográficos de galgamentos e de danos consequentes na marginal do Furadouro.	17
Figura 11 – Danos devido à erosão consequente do escoamento de água no tardoz da obra longitudinal aderente de Cortegaça (CMO, 2014).	18
Figura 12 – Rotura pontual no manto resistente de uma obra longitudinal aderente (CMO, 2014).	18
Figura 13 – Danos a sotamar e na extremidade da obra longitudinal aderente da raiz do esporão Sul de Cortegaça.	19
Figura 14 – Esquema da variação da direção de propagação das ondas devido ao fenómeno de refração.	24
Figura 15 – Relação entre alturas de onda significativa e respetivos períodos de onda, a partir dos dados do Instituto Hidrográfico para a boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003 (Coelho, 2005).	25
Figura 16 – Variação do coeficiente de refração em função dos ângulos entre as ortogonais à batimetria e as direções de propagação das ondas ao largo (α_0) e após refração (α).	26
Figura 17 – Variação do período de onda devido à refração, em função da altura de onda significativa.	26

Figura 18 – Redução do desvio padrão médio das frequências de galgamentos, dependendo dos diferentes mínimos relativos de registos considerados (75%, 66% e 50%).	30
Figura 19 – Curvas para estimativa da percentagem anual de dias com galgamentos, para diferentes cenários de d e ΔH .	32
Figura 20 – Desvios padrão das percentagens anuais de dias com galgamentos calculadas.	33
Figura 21 – Curvas paramétricas da profundidade máxima de erosão relativa, segundo a metodologia de Powell e Lowe (1994).	44
Figura 22 – Curvas paramétricas da profundidade máxima de erosão relativa, segundo metodologia de Powell e Whitehouse (1998).	47
Figura 23 – Relação entre o período de pico e o período de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).	50
Figura 24 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Hughes e Fowler (1991).	51
Figura 25 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Fowler (1992).	51
Figura 26 – Variação da profundidade máxima de erosão relativa em função da profundidade de fundo inicial, para diferentes inclinações médias do perfil de praia e diâmetro mediano dos sedimentos igual a 0,5mm (aplicação da formulação de McDougal <i>et al.</i> , 1996).	52
Figura 27 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de McDougal <i>et al.</i> (1996) especificamente para $m=1\%$ e $d_{50}=0,3\text{mm}$.	53
Figura 28 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Powell e Whitehouse (1998).	54
Figura 29 – Exemplo do comportamento das diversas formulações analisadas em termos de profundidade máxima de erosão e representação da curva média, especificamente para uma profundidade de fundo inicial igual a 2m.	55
Figura 30 – Profundidade máxima erodível do perfil de praia em função da altura de onda ao largo, para várias profundidades de fundo iniciais, considerando a média de diferentes formulações.	55
Figura 31 – Comparação entre os resultados da equação 32 (traço contínuo) e os valores das profundidades máximas de erosão estimadas pela média de diferentes formulações (traço interrompido).	56

Figura 32 – Comportamento das diversas formulações/metodologias analisadas em termos de profundidade máxima de erosão relativa e representação de curvas médias.	57
Figura 33 – Média da profundidade máxima de erosão relativa em função da profundidade de fundo inicial.	57
Figura 34 – Localização da área de estudo (Cruz <i>et al.</i> , 2015).	63
Figura 35 – Rosa de rumos com as classes de direção de propagação da ondulação dos registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003 (Coelho, 2005).	65
Figura 36 – Comparação da direção média anual de ondulação com as situações de temporal persistente (análise dos registos da boia ondógrafo de Leixões, entre 1981 e 2003, por Coelho, 2005).	65
Figura 37 – Alturas de onda significativas ao largo na boia ondógrafo de Leixões, desde 1981 até 2014.	66
Figura 38 – Direção de propagação da ondulação na boia ondógrafo de Leixões, desde 1993 até 2014.	66
Figura 39 – Número e extensão das obras de defesa costeira na zona litoral do concelho de Ovar.	67
Figura 40 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente central de Esmoriz, cuja cota de coroamento é superior à cota da via pública no tardoz.	67
Figura 41 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Cortegaça, com duas banquetas.	67
Figura 42 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente do Furadouro, sem patamares intermédios e com cota de coroamento igual à cota da via pública.	68
Figura 43 – Número de ocorrências registadas entre 1857 e 2015, distribuídas por tipologia: galgamentos, danos em infraestruturas e em obras de defesa costeira.	70
Figura 44 – Distribuição por décadas do número de eventos de danos registadas na zona litoral de Ovar, entre 1857 e 2015.	70
Figura 45 – Número e tipologias de intervenção realizadas na zona costeira de Ovar, entre 1958 e 2014.	75
Figura 46 – Distribuição anual do número de intervenções de defesa costeira realizadas nas praias de Ovar, entre os anos 1958 e 2014.	76
Figura 47 – Custo de intervenções de defesa costeira no concelho de Ovar [10^3€].	77
Figura 48 – Distribuição relativa de custos de intervenção desde 1999 nas praias de Ovar.	77

Figura 49 – Perfil transversal tipo do aumento da cota de coroamento de uma obra longitudinal aderente.	81
Figura 50 – Perfil transversal tipo de uma alimentação artificial de areias à frente de obras aderentes.	83
Figura 51 – Perfil transversal tipo de um patamar intermédio, com uma tipologia de risberma adequada para praias sujeitas a clima de agitação energético, segundo CIRIA <i>et al.</i> (2007a) e Burcharth e Hughes (2011a).	86
Figura 52 – Representação das inclinações equivalente e média do manto resistente para cálculo do parâmetro r_p .	87
Figura 53 – Ábacos para determinação do coeficiente de redução de um patamar intermédio, a partir das suas características geométricas e da altura de onda de projeto.	88
Figura 54 – Influência de um patamar intermédio na redução da frequência de galgamentos de uma obra longitudinal aderente, em função das dimensões (d e ΔH) associadas à obra.	89
Figura 55 – Esquema caracterizador do fenómeno de propagação da erosão e evolução da linha de costa (Pereira e Coelho, 2013).	94
Figura 56 – Linhas de costa do concelho de Ovar desde o ano 1958 (Silva, 2012).	94
Figura 57 – Taxas de erosão/acreção para o trecho costeiro entre a praia de Maceda e a praia de São Jacinto, espaçadas por transetos de 50m (Silva, 2012).	95
Figura 58 – Levantamento de coordenadas batimétricas e topográficas desde Caminha até Peniche.	98
Figura 59 – Linhas de costa a sul do Furadouro modeladas no LTC para um clima de agitação marítima variável, diferentes parâmetros Δt e k_c e horizontes temporais de simulação.	100
Figura 60 – Linhas de costa a sul do Furadouro modeladas no LTC para diferentes climas de agitação marítima e tempos de simulação de 20 e 40 anos.	101
Figura 61 – Projeções de linhas de costa a 20 e a 40 anos relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.	102
Figura 62 – Rácios benefício-custo e valores atuais líquidos ao longo do tempo, para tempos de estabilização do perfil de praia iguais a 0, 20 e 40 anos.	111
Figura 63 – Rácios benefício-custo e valores atuais líquidos dos cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, num prazo de 40 anos.	117
Figura 64 – Vista aérea das áreas afetadas por galgamentos das obras longitudinais aderentes na zona urbana do Furadouro.	160

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura genérica adotada para a contabilização de situações de galgamento de obras longitudinais aderentes, a partir dos dados de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões.	29
Tabela 2 – Critérios de validação dos registos de agitação mensais/anuais da boia ondógrafo de Leixões.	31
Tabela 3 – Profundidade máxima de erosão estimada para profundidades de fundo iniciais até 10m, segundo a metodologia de CERC (1984).	49
Tabela 4 – Localização do ponto do perfil de praia com maior profundidade erodível, segundo as metodologias analisadas no subcapítulo 4.2.	58
Tabela 5 – Somatório de correspondências entre o número calculado e registado de dias com galgamentos, a partir dos registos de agitação da boia de Leixões, em função de diferentes considerações de d e ΔH .	72
Tabela 6 – Custos de reabilitação de obras longitudinais aderentes e reparação de infraestruturas em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, com base nos registos de 1999 a 2014.	77
Tabela 7 – Custos unitários dos materiais considerados no cálculo dos custos das intervenções.	81
Tabela 8 – Taxas médias anuais de variação da posição da linha de costa, em metros/ano (adaptado de EUrosion, 2006 e Pereira e Coelho, 2011).	96
Tabela 9 – Áreas perdidas e não perdidas numa extensão de 5km de costa, relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.	103
Tabela 10 – Taxas de recuo médias verificadas num trecho até 5km a sul do Furadouro, relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.	103
Tabela 11 – Valores considerados na análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção na obra longitudinal aderente central do Furadouro como objetivo de reduzir galgamentos.	109
Tabela 12 – Valores atuais de custos acumulados [M€] do cenário 0 (sem intervenção na obra aderente), por períodos de tempo de 10 anos e para tempos de estabilização do perfil de praia (t_e) iguais a 0, 20 e 40 anos.	111
Tabela 13 – Valores da análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção para reduzir galgamentos, para tempos de estabilização do perfil de praia (t_e) iguais a 0, 20 e 40 anos.	111

Tabela 14 – Valores atuais de custos acumulados do cenário de não haver qualquer prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro (cenário 0), por períodos de tempo de 10 anos [M€]. 116

Tabela 15 – Valores da análise custo-benefício dos cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, para as duas abordagens de variação do valor territorial consideradas. 116

Tabela 16 – Ocorrências e eventos de dano consequentes da ação marítima, registados nas praias do concelho de Ovar desde 1857 até 2015. 143

Tabela 17 – Registos de intervenções realizadas na zona litoral de Ovar, entre 1958 e 2014, com os respetivos custos associados. 151

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ARHC	Administração Regional Hidrográfica do Centro
CCDRC	Comissão de Coordenação do Desenvolvimento Regional do Centro
CESAM	Centro de Estudos do Ambiente e do Mar
CMO	Câmara Municipal de Ovar
CMOS	Comando Distrital de Operações de Socorro
COSMOS-2D	<i>Coastal Storm Modeling System</i>
DA	Diário de Aveiro
DDF	<i>Depth-damage functions</i>
IH	Instituto Hidrográfico
INAG	Instituto Nacional da Água
GENESIS	<i>Generalized Model for Simulating Shoreline Change</i>
LITMOD	<i>Lithospheric Modelling</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LTC	<i>Long-Term Configuration</i>
NMM	Nível Médio da superfície livre do Mar
POVT	Programa Operacional Temático de Valorização do Território
QREN	Quadro de Referência Estratégico Nacional
TOT	“Todo-o-tamanho”: enrocamento não selecionado

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas maiúsculas

A	Parâmetro de escala dos sedimentos, usado na equação do perfil de equilíbrio simplificado de Dean (1977)	[-]
A_i	Área inundada devido aos galgamentos de obras longitudinais aderentes	[ha]
B_c	Largura do coroamento de uma obra longitudinal aderente	[m]
B_p	Largura do patamar intermédio de uma obra longitudinal aderente	[m]
C	Coeficiente adimensional da formulação de Xie (1981, 1985)	[-]
C_a	Estimativa de custo da alimentação artificial do perfil de praia, por metro linear de obra longitudinal aderente	[€/m]
C_c	Estimativa de custo do aumento da cota de coroamento, por metro linear de obra longitudinal aderente	[€/m]
C_D	Coeficiente de arrastamento devido ao efeito das correntes $\left(= \left[0,40 / (\ln(\bar{d}/z_0) - 1)\right]^2\right)$	[-]
C_g	Danos no edificado e perdas de bens materiais devido a inundações consequentes de galgamentos de obras longitudinais aderentes	[€]
C_p	Estimativa de custo da construção de um patamar intermédio, por metro linear de obra longitudinal aderente	[€/m]
C_u	Custo unitário de um material	[€/m ³]
D_{50}	Diâmetro equivalente dos blocos da camada exterior do manto resistente	[m]
D_i	Percentagem de dano em edificado ou em bens materiais devido a inundações (curvas DDF)	[%]
$D_{méd}$	Distância horizontal média entre a zona do perfil de praia mais erodida e a face da estrutura de defesa costeira aderente à costa	[m]
D_*	Parâmetro adimensional da dimensão dos sedimentos	[-]
E	Energia de uma onda	
F	Fluxo de energia de uma onda	

H	Altura de onda	[m]
H_0	Altura de onda ao largo	[m]
H_b	Altura de onda na rebentação ou altura de onda não rebentada	[m]
$H_{bmáx}$	Máxima altura de onda não rebentada na zona de rebentação	[m]
H_c	Altura do coroamento de uma obra longitudinal aderente	[m]
H_i	Altura de onda incidente numa estrutura de defesa costeira	[m]
H_{m0}	Altura de onda significativa ao largo calculada pelo método espectral	[m]
H_{proj}	Altura de onda de projeto	[m]
H_r	Altura de onda refletida numa estrutura de defesa costeira	[m]
H_s	Altura de onda significativa ao largo	[m]
H_t	Altura de onda total, correspondente ao somatório da altura de onda incidente com a altura de onda refletida ($= H_i + H_r$)	[m]
K_N	Rugosidade equivalente do fundo ($\cong 2,5d_{50}$)	[m]
L	Comprimento de onda	[m]
L_0	Comprimento de onda ao largo	[m]
L_i	Comprimento de onda incidente numa estrutura de defesa costeira	[m]
L_m	Comprimento de onda médio antecedente à rebentação	[m]
L_s	Comprimento da zona erodida à frente de uma estrutura de defesa costeira aderente à costa	[m]
N	Número de valores usados no cálculo do desvio padrão	[-]
N_{cal}	Número de processos de cálculo de uma modelação numérica	[-]
Q	Volume potencial de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa num determinado intervalo de tempo	[m ³ /s]
$R_{2\%}$	Altura de espraçamento excedida por 2% das ondas incidentes	[m]
$R_{máx}$	Altura de espraçamento máxima	[m]
RBC	Rácio benefício-custo	[-]

S	Profundidade de erosão num ponto do perfil de praia em frente a estruturas de defesa costeira aderentes à costa	[m]
$S_{máx}$	Profundidade máxima de erosão no perfil de praia em frente a estruturas de defesa costeira aderentes à costa	[m]
T	Período de onda	[s]
T_0	Período de onda ao largo	[s]
T_e	Período de onda espectral	[s]
T_{Hs}	Período de onda correspondente à média dos períodos das ondas utilizadas no cálculo da altura de onda significativa	[s]
T_{htp}	Direção média associada ao período de pico	[°]
T_p	Período de pico	[s]
V	Valor monetário não atualizado	[€]
V_a	Volume de areia de uma alimentação artificial, por metro linear	[m ³ /m]
VA	Valor monetário atualizado à data de referência	[€]
VAB	Valor nominal de benefício	[€]
VAC	Valor atualizado de custo	[€]
VAL	Valor atual líquido	[€]
VB	Valor nominal de benefício	[€]
VC	Valor nominal de custo	[€]
X	Distância horizontal desde um ponto do perfil de praia até à posição inicial da linha de costa	[m]
X_b	Distância horizontal desde a zona de rebentação até à posição inicial da linha de costa (largura da zona de rebentação)	[m]
X_r	Distância horizontal desde a risberma até à posição inicial da linha de costa	[m]

Letras latinas minúsculas

c	Celeridade de uma onda	[m/s]
c_0	Celeridade de uma onda ao largo	[m/s]
c_1	Constante usada no cálculo da profundidade máxima de erosão pela expressão 32	[–]
c_2	Constante usada no cálculo da profundidade máxima de erosão pela expressão 32	[–]
d	Profundidade de fundo à face de uma estrutura de defesa costeira aderente à costa	[m]
\bar{d}	Profundidade de fundo média do perfil de praia antes da rebentação	[m]
d_{50}	Diâmetro mediano efetivo dos sedimentos	[mm]
d_a	Profundidade de fundo à face de uma estrutura de defesa costeira aderente à costa após alimentação artificial do perfil de praia	[m]
d_i	Profundidade de fundo inicial à face de uma estrutura de defesa costeira aderente à costa	[m]
d_f	Profundidade de fundo final à face de uma estrutura de defesa costeira aderente à costa	[m]
d_p	Distância vertical entre um patamar intermédio e o NMM	[m]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Profundidade de fundo ao longo do perfil de praia, dada pela equação do perfil de equilíbrio simplificado de Dean (1977)	[m]
h_c	Profundidade de fecho	[m]
h_i	Altura de inundação	[m]
i_1, i_2	Inclinação do manto resistente frontal e no tardo de uma obra longitudinal aderente, respetivamente	[H/V]
k	Número de onda, segundo a teoria linear de <i>Airy</i> ($= 2\pi/L$)	[–]
k_b	Índice de rebentação	[–]

k_c	Coeficiente empírico de proporcionalidade da fórmula CERC	[–]
k_i	Número de onda incidente, segundo a teoria linear de <i>Airy</i> ($= 2\pi/L_i$)	[–]
k_p	Número de onda associado ao pico espectral ($= 4\pi^2/gT_p^2$)	[–]
k_r	Coeficiente de refração	[–]
k_{rf}	Coeficiente de reflexão ($= H_r/H_i$)	[–]
k_s	Coeficiente de empolamento	[–]
m	Inclinação média do perfil de praia ou parâmetro de inclinação do perfil de equilíbrio simplificado de Dean (1977)	[V/H] [–]
n	Porosidade dos sedimentos	[%]
r	Taxa de desconto	[%]
r_{dp}	Parâmetro de profundidade do patamar intermédio de uma obra longitudinal aderente (Waal e van der Meer, 1992)	[–]
r_p	Parâmetro de inclinação do patamar intermédio de uma obra longitudinal aderente (Waal e van der Meer, 1992)	[–]
s	Relação entre pesos específicos dos sedimentos e do fluido	[–]
t	Prazo de uma modelação numérica ou tempo de um valor monetário	[anos]
t_e	Tempo de estabilização do perfil de praia	[anos]
u_*	Velocidade horizontal de corrente junto ao fundo	[m/s]
u_{cr}	Velocidade crítica de movimento incipiente	[m/s]
$u_{máx}$	Velocidade máxima horizontal junto ao fundo, segundo teoria linear de ondas	[m/s]
u_n	Velocidade máxima horizontal no nodo junto ao fundo, segundo teoria de ondas de segunda ordem	[m/s]
u_{rms}	Velocidade orbital média quadrática junto ao fundo	[m/s]
$(u_{rms})_m$	Máxima velocidade orbital média quadrática junto ao fundo	[m/s]

x	Distância horizontal desde um ponto do perfil de praia até à linha de costa ou risberma da obra longitudinal aderente	[m]
\bar{x}	Média aritmética dos valores usados no cálculo do desvio padrão	
x_c	Distância horizontal entre a linha de costa e a profundidade de fecho	[m]
x_c^i, x_c^a	Distâncias horizontais entre a risberma de uma obra longitudinal aderente e a profundidade de fecho, antes e após alimentação artificial do perfil de praia, respetivamente	[m]
x_i	Valores usados no cálculo do desvio padrão	
z_0	Comprimento de rugosidade hidráulica ($= K_N/30$)	[m]

Letras gregas maiúsculas

ΔH	Diferença entre a cota de coroamento de uma estrutura de defesa costeira e o nível da superfície livre do mar	[m]
ΔT	Variação do período de onda devido ao fenómeno de refração	[%]
Δt	<i>Time-step</i> de uma modelação numérica	[h]
	No LTC: intervalo de tempo entre diferentes regimes de ondas e marés	
Ψ_n	Número de mobilidade no nodo de uma onda estacionária	[-]

Letras gregas minúsculas

α	Ângulo entre as ortogonais à batimetria e a direcção de propagação das ondas refratadas	[°]
$\bar{\alpha}$	Inclinação média do manto resistente de uma obra longitudinal aderente, excluindo os patamares intermédios	[°]
α_0	Ângulo entre as ortogonais à batimetria e a direcção de propagação das ondas não refratadas ao largo	[°]
α_1	Inclinação do manto resistente abaixo do patamar intermédio	[°]
α_2	Inclinação do manto resistente acima do patamar intermédio	[°]

α_b	Ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa	[°]
α_{eq}	Inclinação equivalente do manto resistente de uma obra longitudinal aderente, incluindo os patamares intermédios	[°]
α_i	Parâmetro adimensional das curvas DDF (Davis e Skaggs, 1992)	[–]
β	Inclinação do manto resistente de uma obra de defesa costeira, medida com a horizontal ($30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$)	[°]
β_i	Parâmetro adimensional das curvas DDF (Davis e Skaggs, 1992)	[–]
γ_p	Coefficiente de redução de um patamar intermédio	[–]
γ_s	Peso específico dos sedimentos	[kN/m ³]
γ_w	Peso específico da água do mar	[kN/m ³]
θ	Ângulo de atrito de sedimentos	[°]
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática	[m ² /s]
ν_i	Valor das zonas edificadas	[€/ha]
ξ	Número de <i>Iribarren</i>	[–]
ρ	Densidade relativa do fluido	[–]
ρ_w	Densidade relativa da água do mar	[–]
σ	Desvio padrão	
τ_c	Tensão tangencial no fundo relativa ao efeito das correntes	[Pa]
ω	Velocidade de queda dos sedimentos	[m/s]

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Apesar de diversas zonas do litoral apresentarem graves problemas de erosão costeira e existir um aumento intrínseco do risco e frequência de ocorrências que causem prejuízos avultados nas frentes urbanas (galgamentos, inundações), estas zonas são cada vez mais procuradas pelas populações, originando um aumento das taxas de ocupação e artificialização (Lima, 2011). É por isso cada vez mais urgente a adoção de políticas bem fundamentadas que façam face aos problemas de exposição das frentes costeiras. Torna-se necessário obter um bom grau de conhecimento dos diversos fenómenos físicos relacionados com a dinâmica costeira, bem como dos impactos positivos e negativos das diversas estratégias de defesa costeira.

O principal pressuposto que serve de base à elaboração deste trabalho é a otimização do processo de tomada de decisão. Pretende-se fazer uma avaliação de custos e benefícios de obras longitudinais aderentes como proteção do litoral contra a erosão (com particular incidência na zona litoral do concelho de Ovar), de forma a auxiliar e servir de base a eventuais tomadas de decisão por parte das entidades governamentais.

1.1. Enquadramento do problema

As zonas costeiras são sistemas complexos e heterogéneos resultantes de uma evolução ao longo de milhões de anos, cujas características foram e são estabelecidas de forma dinâmica, dependendo das alterações das ações hidromorfológicas do meio envolvente. A configuração e posição da linha de costa apresenta grande variabilidade e está associada a um conjunto de ações dinâmicas como a agitação marítima, as marés astronómicas e as marés meteorológicas, os ventos e as correntes de diferentes origens (Coelho, 2005). De facto, neste momento existe uma tendência erosiva crescente na generalidade da costa portuguesa, com maior ênfase na costa Noroeste, podendo atingir em situações extremas e localizadas, taxas de recuo na ordem dos 20m/ano.

Perante este cenário e face aos conflitos existentes entre ocupações e essas regressões da zona terrestre, diferentes alternativas de intervenção de defesa costeira têm sido efetuadas em zonas de maior sensibilidade e vulnerabilidade, sendo uma das mais frequentes a construção de obras longitudinais aderentes. Na maioria dos casos, essas intervenções são fulcrais para a segurança de populações e de centros urbanos. No entanto, os fenómenos de erosão, inicialmente resultantes de uma significativa redução nos fornecimentos

sedimentares, são agravados pela crescente artificialização da zona costeira (INAG, 2009). Por outro lado, as obras longitudinais aderentes têm elevados custos de reabilitação, que são muitas vezes menosprezados e minorados aquando da sua construção. Devido à falta de monitorização e aos níveis de eficácia variáveis no tempo, a falta de manutenção tem conduzido a situações frequentes de ocorrência de danos em diversas localidades, não só na própria estrutura, mas também nas zonas marginais às obras aderentes.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho corresponde a desenvolver uma análise custo-benefício de obras longitudinais aderentes a partir da avaliação de todos os seus impactes positivos e negativos, quer em termos de comportamento e eficiência no controlo da ação direta das ondas, quer em termos de proteção das zonas costeiras.

Para isso considera-se necessário desenvolver uma metodologia de cálculo para estimar a frequência de galgamentos deste tipo de estruturas em função das suas principais características geométricas. O estudo do afundamento do perfil de praia em frente à obra permite estimar a evolução da frequência de galgamentos ao longo do tempo e projetar a evolução futura da severidade das situações de dano quer nas próprias obras aderentes, quer nas zonas marginais. Desta forma, é possível prever a evolução dos custos de reabilitação das estruturas de defesa costeira, bem como de todos os custos associados aos galgamentos e às inundações das zonas urbanas (danos em bens materiais e no edificado, reparações de infraestruturas e limpeza da via pública). Face a este problema, pretende-se também estudar várias abordagens de intervenção de modo a reduzir a frequência de galgamentos de obras longitudinais aderentes, avaliando-se a eficiência e o custo de cada solução de intervenção. Desta forma, pretende-se aplicar as metodologias desenvolvidas ao caso de estudo (obra longitudinal aderente do Furadouro) e estimar a evolução da frequência de galgamentos, permitindo contabilizar concretamente todos os custos e benefícios associados às diversas soluções de intervenção.

Por outro lado, torna-se fulcral compreender se os custos diretos e indiretos de construção e manutenção de obras longitudinais aderentes são vantajosos ou não, relativamente ao valor económico, social e histórico do património que protegem. Por conseguinte, pretende-se avaliar diversos cenários de prolongamento das obras longitudinais aderentes do Furadouro para sotamar, permitindo analisar a evolução da linha de costa a partir da

sua modelação numérica. Com base nas áreas territoriais perdidas e nas áreas não perdidas devido à fixação da posição da linha de costa, é possível estudar a viabilidade económica do uso de obras longitudinais aderentes para fazer face à erosão.

Em suma, para além das análises custo-benefício aplicadas ao caso do Furadouro, pretende-se disponibilizar diversas ferramentas que permitam avaliar o comportamento de obras longitudinais aderentes e a eficiência de diversas alternativas de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos destas estruturas. Este trabalho deverá constituir um meio de auxílio às entidades governamentais que têm a seu cargo a tomada de decisão, no que diz respeito à escolha de soluções de intervenção e de alternativas de defesa costeira para fazer face aos conflitos cada vez mais insurgentes entre as ocupações nos centros urbanos e a erosão.

1.3. Metodologia e estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em nove capítulos. Após um sucinto enquadramento do âmbito de estudo desta dissertação, segue-se o segundo capítulo, onde se procede a uma descrição das obras longitudinais aderentes e caracterização de todos os seus elementos constituintes, quer em termos de perfil transversal, quer em termos de geometria em planta. É também feita referência aos materiais e à estabilidade estrutural deste tipo de estruturas, enumerando diversos fenómenos causadores de instabilidade e potenciadores de roturas pontuais ou totais das obras aderentes, tais como: a erosão no perfil de praia; subescavações; galgamentos; escoamentos de água no tardo; assentamentos; e erosão a sotamar. Por último, e de forma breve, são expostas algumas considerações acerca da manutenção e monitorização de obras longitudinais aderentes.

No terceiro capítulo pretende-se estimar a frequência de galgamentos de uma obra longitudinal aderente, a partir das suas dimensões, nomeadamente, da profundidade de fundo na risberma da obra (d), e do desnível (ΔH) entre a cota de coroamento e o nível médio do mar (NMM). Descreve-se detalhadamente a metodologia adotada para contabilizar as situações de galgamento, partindo de uma análise teórica dos registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões.

O quarto capítulo apresenta um estudo da evolução do perfil de praia à frente de obras longitudinais aderentes. Este inclui a análise de um conjunto de metodologias de cálculo, cujo propósito é estimar a profundidade máxima de erosão do perfil de praia. Nesse sentido, são desenvolvidas análises de sensibilidade de algumas das formulações

analisadas, procedendo-se, por último, a uma análise estatística de todos os resultados, de forma a permitir avaliar a erodibilidade do perfil de praia, com consequências na frequência de ocorrência de galgamentos ao longo do tempo.

No quinto capítulo é descrito o caso de estudo desta dissertação: a zona litoral do concelho de Ovar (praias de Esmoriz, Cortegaça, Maceda e Furadouro), com especial incidência na praia do Furadouro. Apresenta-se o clima de agitação marítima característico do local, bem como as obras de defesa costeira existentes. É enumerado um conjunto de eventos de dano registados nas praias do concelho devido à ação marítima. São também apresentadas as diversas intervenções de defesa costeira realizadas ao longo do tempo, onde são expostos alguns custos associados a essas intervenções. Neste capítulo são aplicadas as metodologias explicadas no terceiro e quarto capítulos, estimando-se a frequência atual de galgamentos da obra longitudinal aderente central da praia do Furadouro e a projeção da sua evolução no tempo. A aplicação das metodologias referidas tem como objetivo contabilizar os encargos associados aos eventos de dano.

No sexto capítulo são estudadas três tipologias de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos: o aumento da cota de coroamento; a alimentação artificial do perfil de praia; e a construção de um patamar intermédio no talude da obra. Estas soluções foram aplicadas ao caso específico da obra aderente central do Furadouro, estimando-se o impacto direto e a longo prazo em termos de frequência de galgamentos. Foi também estimado o custo direto de cada intervenção.

O sétimo capítulo refere-se ao estudo da evolução da posição da linha de costa, onde inicialmente são descritos os fenómenos de propagação da erosão e as taxas de recuo verificadas no concelho de Ovar. Posteriormente é realizada uma análise à evolução da linha de costa a sotamar da praia do Furadouro, recorrendo ao modelo numérico LTC (*Long-Term Configuration*). Foram ainda desenvolvidas análises de sensibilidade a vários parâmetros necessários na aplicação do modelo e estudados diversos cenários de prolongamento das obras longitudinais aderentes do Furadouro para sul, permitindo obter estimativas para as taxas de recuo médias e para as áreas perdidas ou não perdidas por efeito da intervenção.

De seguida, no oitavo capítulo, é feita uma análise custo-benefício dos cenários descritos nos dois capítulos anteriores, referentes a intervenções realizadas para reduzir a frequência de galgamentos e ao prolongamento de obras longitudinais aderentes, para

fazer face à erosão. A análise foi aplicada especificamente ao caso da praia do Furadouro, partindo das metodologias e conjunto de valores explicitados ao longo do trabalho.

Por último, o nono capítulo apresenta as considerações finais sobre o trabalho realizado, pretendendo-se destacar as principais conclusões desta dissertação e propor possíveis desenvolvimentos futuros que contribuam para a melhoria e continuidade deste trabalho e para o aprofundamento do estudo deste tema.

OBRAS LONGITUDINAIS ADERENTES

2. OBRAS LONGITUDINAIS ADERENTES

Obras longitudinais aderentes são estruturas artificiais de defesa costeira construídas ao longo da face de um cordão dunar ou do talude inclinado de uma praia. São constituídas por enrocamento, blocos de betão ou geossintéticos e têm como principal objetivo a proteção da linha de costa da erosão (Burcharth e Hughes, 2011b). Conduzem a uma redução e dissipação da energia de ondulação através do impacto direto das ondas na face dos blocos e nos seus espaços vazios (Coelho, 2005). Estas obras são normalmente utilizadas em situações de emergência em zonas costeiras de grande vulnerabilidade à ação marítima onde os riscos de ocorrência de danos nas edificações e infraestruturas localizadas nas proximidades da praia são elevados. São muitas vezes conjugadas com outros tipos de ações de defesa costeira, como esporões ou alimentação artificial de areias (Burcharth e Hughes, 2011b). Noutros casos são também utilizadas para delimitar arruamentos e/ou aterros marginais, assumindo completamente uma função de retenção de solos (Taveira-Pinto, 2001).

2.1. Caracterização da solução estrutural

Neste subcapítulo é feita uma descrição e caracterização dos elementos constituintes das obras longitudinais aderentes, quer em termos de perfil transversal, quer em termos de geometria em planta e materiais tipicamente usados.

2.1.1. Perfil transversal

Este tipo de estrutura caracteriza-se por ter um paramento inclinado que acompanha o declive da praia ou do cordão dunar ao longo da extensão da zona a proteger (Marinho, 2013). O seu perfil transversal é composto por uma zona de fundação, um núcleo, várias camadas constituintes e uma zona de coroamento, podendo assumir formas diversas conforme a sua conceção e função principal (Taveira-Pinto, 2001). Geralmente, a secção transversal é constante em termos de dimensões e de materiais ao longo do comprimento da estrutura, podendo em alguns casos apresentar algumas variações devido, por exemplo, à existência de solos de fundação de diferentes características mecânicas, à variabilidade da profundidade de fundo e da batimetria ao longo do comprimento da obra (ondulação incidente com diferentes características), ou a restrições espaciais.

2.1.1.1. Fundação

Devido à ação da ondulação incidente e à sua reflexão na estrutura, a fundação da obra longitudinal aderente deve assumir uma tipologia que evite eventuais subescavações e assentamentos. Em CIRIA *et al.* (2007a) são propostos vários critérios de dimensionamento de risbermas, elemento estrutural que estabiliza a fundação. A diferença entre a cota superior da fundação e o NMM deve ser pelo menos 1,5 vezes a altura de onda de projeto (H_{proj}). Outras abordagens sugerem uma profundidade mínima da risberma no valor de 2,5 vezes a altura de onda não rebentada (H_b). Geralmente é composta por blocos de iguais características aos blocos constituintes do talude, funcionando como um prolongamento dos mantos resistentes. No caso de existir um estrato rochoso ou de menor permeabilidade a pouca profundidade, é conveniente prolongar o manto resistente até ao sub-estrato de forma a evitar erosões na base devido a percolações da água do mar (Figura 1).

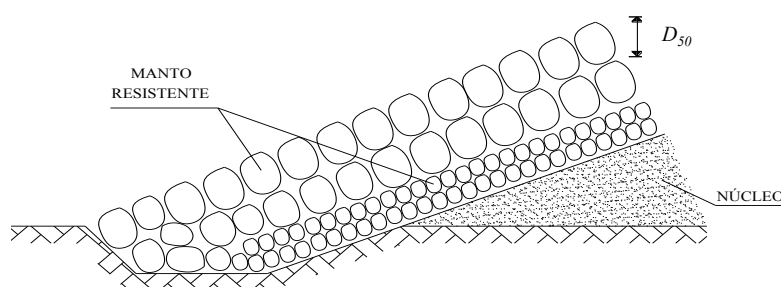


Figura 1 – Perfil tipo da fundação de uma obra longitudinal aderente em estrato rochoso (adaptado de Lima, 2011, baseado em CIRIA *et al.*, 2007a).

Quando o fundo é constituído por solos arenosos, é aconselhável colocar mantas geotêxteis sob as camadas filtrantes. Neste caso, o grau de erodibilidade do local de implementação da obra aderente condiciona diretamente a tipologia de fundação a adotar. A Figura 2 apresenta algumas das tipologias aconselhadas por CIRIA *et al.* (2007a) e por Burcharth e Hughes (2011a).

Apesar dos solos arenosos apresentarem usualmente permeabilidade elevada, sempre que se prevejam assentamentos futuros por consolidação devido a excessos de pressões intersticiais, aquando da implementação da obra, é aconselhável proceder a um pré-carregamento até à estabilização das pressões neutras. O carregamento prévio consiste na colocação prévia de blocos no fundo, de modo a antecipar os assentamentos por consolidação.

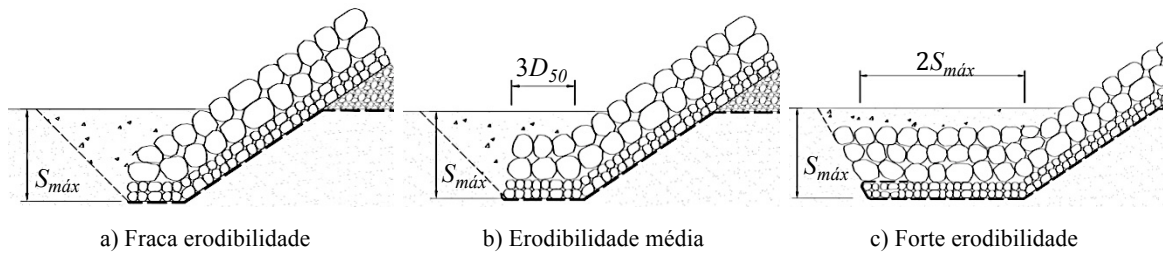


Figura 2 – Tipologias de fundação aconselhadas para diferentes graus de erodibilidade do perfil de praia (adaptado de CIRIA *et al.*, 2007a).

2.1.1.2. Núcleo

O núcleo de uma obra longitudinal aderente tem como objetivos o “enchimento” do tardo da estrutura e a regularização da superfície do talude, permitindo a execução das camadas constituintes segundo as especificações dimensionadas (inclinação do talude, suporte para patamares intermédios e coroamentos, etc.). É comumente constituído por enrocamento não selecionado denominado de T.O.T. (“todo o tamanho”), com blocos de dimensões variadas e pesos bastante inferiores aos dos blocos exteriores do manto resistente (relação de pesos na ordem dos 1/4000).

2.1.1.3. Camadas constituintes

Sobre o núcleo é colocada uma camada filtrante de apoio ao manto resistente constituída por areias ou por encoramento selecionado com blocos cujos pesos são inferiores aos dos blocos exteriores do manto resistente (numa razão de cerca de 1/200), podendo ou não recorrer-se ao uso de filtros geotêxteis, de forma a estabelecer uma zona de separação com o núcleo e a evitar a erosão do filtro. O manto resistente das obras longitudinais aderentes é a zona que recebe diretamente o impacto da ondulação. Segundo Burcharth e Hughes (2011a), deve ser constituído por duas camadas cuja espessura depende essencialmente do peso e dimensão dos blocos que as constituem, sendo que os blocos da camada mais interior podem ter até um décimo o peso dos blocos exteriores. A Figura 3 ilustra esquematicamente a secção transversal típica de obras longitudinais aderentes.

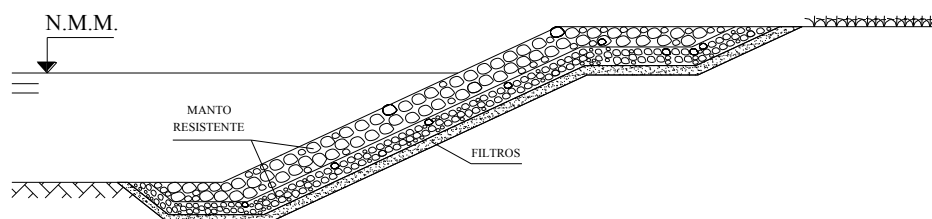


Figura 3 – Esquema do perfil de obras longitudinais aderentes (Lima, 2011, baseado em Fleming *et al.*, 1998).

A inclinação do talude depende proporcionalmente do tamanho e peso dos blocos constituintes e deve ser estabelecida de modo a evitar roturas por escorregamento, a mitigar o efeito da reflexão da onda na estrutura e a reduzir probabilidade de ocorrência de galgamentos (CIRIA *et al.*, 2007b).

2.1.1.4. Patamares intermédios

Em situações específicas, as obras longitudinais aderentes podem conter um ou mais patamares ou banquetas intermédias construídas ao longo do talude (Figura 4), a diferentes cotas em relação ao NMM. Estes patamares têm como objetivo principal o controlo da rebentação das ondas consoante o nível de maré, fazendo com que as ondas que antes atingiam diretamente a obra aderente, rebentem ao nível do patamar. Desta forma, evitam a dissipação de energia diretamente no talude principal da estrutura, reduzindo o espraçamento das ondas e, caso ocorram, a frequência de galgamentos. São usualmente constituídos pelas mesmas camadas do talude (explícitas em 2.1.1.3) e sobre um prolongamento do núcleo.



a) Vista aproximada do patamar inferior



b) Vista lateral dos patamares intermédios

Figura 4 – Obra longitudinal aderente de Cortegaça com dois patamares intermédios (CMO, 2014).

2.1.1.5. Rampas de acesso

Algumas obras longitudinais aderentes têm rampas pontuais cuja função é o acesso de pedestres e/ou veículos à praia. Embora tenham a mesma constituição, a função é distinta dos patamares intermédios. No entanto, apresentam semelhanças em termos de comportamento face à agitação marítima, visto que permitem localmente a rebentação prévia das ondas. A Figura 5 mostra, a título de exemplo, duas rampas de acesso em obras longitudinais aderentes.



a) Lado sul da raiz do esporão norte do Furadouro



b) Lado sul do esporão sul de Esmoriz

Figura 5 – Exemplos de rampas de acesso à praia existentes no litoral de Ovar (CMO, 2014).

2.1.1.6. Coroamento

A cota de coroamento pode ser ao nível, inferior ou superior à cota do terreno no tardo da obra e depende do grau de segurança que se pretende para a estrutura, ou seja, qual a frequência admissível de ocorrências de galgamento. Assim sendo, a cota de coroamento é definida em função do espraimento considerado em projeto. A largura de coroamento depende da cota de coroamento e do valor considerado para o peso unitário dos blocos da camada exterior do manto resistente (Burcharth e Hughes, 2011a). As obras longitudinais aderentes podem também ser dotadas de uma supraestrutura construída em betão ou alvenaria (Figura 6), destinada a reduzir os galgamentos, a melhorar a contenção dos solos no tardo ou a facilitar a circulação de pedestres na marginal e o acesso à praia.



a) Muro de contenção em betão armado na obra longitudinal aderente de Cortegaça



b) Superestrutura da obra aderente central do Furadouro: murete de betão armado

Figura 6 – Exemplos de tipologias de superestruturas em obras longitudinais aderentes (CMO, 2014).

2.1.2. Geometria em planta

As obras longitudinais aderentes apenas protegem as zonas adjacentes e, por isso, o seu comprimento deve acompanhar as zonas que se pretendem proteger. No entanto, este tipo de estruturas apresenta fragilidades nas suas extremidades, particularmente no remate a sotamar (CIRIA *et al.*, 2007b). Muitas vezes, são admitidas em projeto configurações em

planta com vários ramos na extremidade a sotamar, para evitar a erosão no talude posterior (Figura 7b).



a) Obras longitudinais aderentes norte e central, adjacentes ao esporão norte do Furadouro (José Monteiro, 2014)



b) Remate com dois ramos e rampa de acesso da obra aderente a sul de Cortegaça (Carlos Coelho, 2014)

Figura 7 – Exemplo de obras de defesa costeira complementares.

Este tipo de estruturas é complementar a outras soluções de defesa costeira. De acordo com Coelho (2005), encontram-se obras aderentes em quase todos os campos de esporões construídos em Portugal, devido ao usual défice sedimentar a sotamar dos esporões, consequente da retenção de sedimentos da deriva longitudinal a barlamar. A raiz do esporão é colmatada por uma obra aderente, evitando situações de instabilidade (Figura 7).

2.1.3. Materiais constituintes

Os materiais constituintes das obras longitudinais aderentes são fulcrais para um bom desempenho e longevidade. A sua escolha pressupõe uma análise e ponderação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais; da sua aplicabilidade e adequabilidade; da disponibilidade de aquisição; dos requisitos de manutenção; da sustentabilidade e dos impactes ambientais associados à extração/manufatura dos materiais, bem como de todos os custos inerentes (Hughes, 2006). Filtros geotêxteis, areia, betão, misturas betuminosas e enrocamentos selecionados ou não selecionados são exemplos de materiais usualmente utilizados na construção de obras longitudinais aderentes.

O manto resistente, constituído por enrocamento selecionado ou por blocos pré-fabricados de betão, é o elemento que mais está sujeito à ação direta das ondas. Como tal, o seu meio envolvente é muito agressivo, sendo aí que os processos de degradação dos materiais são mais severos. A deterioração dos blocos de rocha dá-se essencialmente através de processos de desgaste físicos: fraturação, fissuração superficial e abrasão. No

caso de blocos de betão, os processos de origem química são também bastante relevantes, dos quais se destacam: a exposição aos sais da água do mar e a ataques ácidos; a presença de cloretos; reações entre os agregados e a álcalis; e reações de carbonatação. Estes processos dão origem a uma redução da resistência mecânica do betão ao longo do tempo que potencializa a degradação física dos blocos.

Neste trabalho irá ser dada maior ênfase às obras aderentes cujos mantos resistentes são constituídos por enrocamentos, por ser esta a solução mais comumente utilizada neste tipo de obras em Portugal. O material rochoso apresenta geralmente: boa durabilidade, resistindo ao desgaste provocado pela ação das ondas e marés; boa capacidade de absorção da energia das ondas, devido à sua porosidade e arredondamento das faces; flexibilidade de adaptação a assentamentos da estrutura ou a alterações ambientais; baixos custos, devido à possibilidade da sua aquisição nas imediações do local da obra; e enquadramento paisagístico que minimiza o impacto visual da obra aderente (Lima, 2011).

2.2. Estabilidade estrutural e impactes no perfil de praia

A eficiência deste tipo de estruturas é condicionada por vários tipos de fenómenos, entre os quais se destacam: assentamentos, subescavações, galgamentos e problemas de erosão na extremidade a sotamar. A não contabilização destes aspetos pode resultar na destruição parcial ou total da obra aderente quando sujeita a condições extremas de agitação marítima (Taveira-Pinto, 2001).

2.2.1. Erosão no perfil de praia

Este tipo de estruturas, para além de ter um papel dissipativo da energia de ondulação, também proporciona a reflexão das ondas, cujo refluxo dá origem a transporte sedimentar para *offshore* e que, em acréscimo ao eventual défice sedimentar e correntes longitudinais, reduz a quantidade de sedimentos na zona frontal à obra longitudinal aderente e leva a uma tendência de abaixamento do perfil de praia. Este fenómeno é estudado com maior detalhe no capítulo 4.

2.2.2. Subescavações

Associado ao fenómeno descrito em 2.2.1 está a erodibilidade da zona do pé de talude (ou zona de fundação). O aumento da profundidade de fundo à face da estrutura pode modificar o arranjo dos blocos da risberma (Figura 8) e induzir instabilidade nos

elementos posteriores, comprometendo o desempenho global da obra longitudinal aderente nas zonas afetadas (Burcharth e Hughes, 2011b).

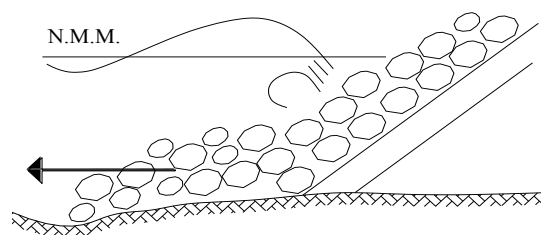


Figura 8 – Esquema da rotura típica da fundação de uma obra longitudinal aderente devido a subescavações (Lima, 2011, baseado em CIRIA *et al.*, 2007a).

Durante tempestades, onde o clima de agitação marítima é mais agressivo, o perfil de praia tende a erodir de forma mais rápida, ameaçando a estabilidade da fundação das obras aderentes num curto espaço de tempo. Um exemplo disso foi a intempérie do início dos anos 2013 e 2014 (Figura 9).



a) Desarranjo generalizado de blocos



b) Rotura do manto resistente



c) Rotura pontual do coroamento solidificado



d) Assentamentos de apoio na laje da marginal

Figura 9 – Roturas da obra longitudinal aderente central do Furadouro devido a subescavações, após intempéries dos anos de 2013 e 2014 (CMO, 2014).

2.2.3. Galgamentos

Devido ao facto de normalmente estarem sob a ação direta da ondulação, as obras longitudinais aderentes podem, em situações extremas ou com maior frequência, permitir a ocorrência de galgamentos para a via pública. A tendência de abaixamento do perfil de praia descrita nas secções anteriores leva a um aumento gradual da profundidade de fundo à face da estrutura, o que permite que ondas de maior altura atinjam as obras, aumentando a frequência de galgamentos. Nestas situações, é comum o reforço da dimensão das estruturas ao longo do tempo, para fazer face às novas solicitações. Este processo é estudado com maior detalhe no capítulo 3. A Figura 10 reúne alguns dos registos mais impressionantes de galgamentos e dos danos consequentes na marginal da obra aderente central do Furadouro.



a) Exemplo do caudal galgável (Estela Silva – Agência Lusa, 2014)



b) Altura de espraçamento quando a onda rebenta ao incidir na obra (Jenni Alves, 2014)



c) Fluxo de água contido pela superestrutura (Fernando Santos, 2014)



d) Detritos na marginal pós-galgamentos (Fernando Santos, 2014)

Figura 10 – Registos fotográficos de galgamentos e de danos consequentes na marginal do Furadouro.

2.2.4. Escoamentos no tardoz

Outro aspeto importante é o escoamento de água no tardoz de uma obra aderente (Figura 11). Aquando da ocorrência de galgamentos, ou da presença de água pluvial no coroamento da estrutura, a água pode infiltrar-se na zona do tardoz e transportar os

sedimentos aí retidos, criando problemas de instabilidade (Burcharth e Hughes, 2011b). Fredsøe e Sumer (1997) realizaram várias experiências laboratoriais em modelos à escala em muros com paramento vertical e liso, permitindo desenvolver fórmulas conservativas para estimar a erosão no coroamento e tardo de estrutura.



a) Coroamento não solidificado



b) Coroamento solidificado

Figura 11 – Danos devido à erosão consequente do escoamento de água no tardo de obra longitudinal aderente de Cortegaça (CMO, 2014).

2.2.5. Assentamentos

Quando as fundações não atingem estratos rochosos, devido ao elevado peso próprio da obra e à compressibilidade dos solos normalmente arenosos, podem vir a verificar-se assentamentos de grandeza considerável que podem modificar ao longo do tempo o arranjo adequado dos blocos, comprometendo a sua estabilidade (Figura 12).



Figura 12 – Rotura pontual no manto resistente de uma obra longitudinal aderente (CMO, 2014).

2.2.6. Erosão a sotamar

O fenómeno da refração das ondas, juntamente com a difração da ondulação em torno da extremidade sotamar da obra, origina correntes que tendem a erodir a zona da

extremidade a sotamar das obras longitudinais aderentes (CIRIA *et al.*, 2007b). Ao longo do tempo, ou em períodos de agitação mais energética, os sedimentos do tardo da obra na sua extremidade poderão começar a ser transportados, originando a rotura parcial da estrutura (Figura 13). Na secção 2.1.2 explicitam-se algumas configurações do remate da estrutura para evitar a instabilidade devido a estes processos.



a) Erosão no tardo e rotura no remate da obra aderente (Carlos Coelho, 2014)



b) Impactes a sotamar das estruturas de defesa costeira (Fernando Santos, 2014)

Figura 13 – Danos a sotamar e na extremidade da obra longitudinal aderente da raiz do esporão Sul de Cortegaça.

2.3. Manutenção e monitorização

A monitorização das obras de defesa costeira é de extrema importância, particularmente em obras aderentes, pois permite uma melhor compreensão do seu comportamento em serviço. Para além disso, a observação sistemática do seu comportamento possibilita a previsão e planeamento antecipado de eventuais obras de manutenção, contribuindo para o melhor dimensionamento de obras futuras. O projeto destas estruturas deverá, portanto, incluir um programa monitorização do comportamento estrutural, que permita a caracterização do comportamento do manto resistente, do patamar de apoio (quando existe) e do talude posterior, no tardo da obra. A observação das camadas do manto resistente deve ser periódica e cuidada, verificando se existem pequenas fragilidades, como deslocamentos, assentamentos, rombos ou degradação dos blocos, de forma a identificar a necessidade de se realizar pequenas intervenções de reparação que impeçam o mecanismo de rotura de atingir proporções que causem a destruição total ou quase total da estrutura (Marinho, 2013).

Contudo, a monitorização das obras aderentes não se deve cingir apenas à sua estrutura, mas também à envolvente. A erosão no tardo da extremidade a sotamar deve ser avaliada. Quando a estrutura está assente em solos arenosos, o risco de ocorrência de

subescavações deve ser estimado periodicamente, através do levantamento da batimetria dos fundos. A aquisição destes dados também permite a avaliação dos impactos que as obras aderentes têm no perfil de praia e no regime de transporte sedimentar, permitindo, por exemplo, maior exatidão na previsão de galgamentos (Lima, 2011). A negligência da monitorização destas estruturas implica que as eventuais intervenções de manutenção acarretem maiores custos e tenham com maior frequência carácter de emergência, aumentando a probabilidade de ocorrência de danos materiais e pessoais.

Em relação à periodicidade dos planos de monitorização, segundo IHRH/FEUP (2010) deverão ser realizados sempre que sejam reportados danos na estrutura ou pelo menos uma vez por ano, após o período invernal. Todas as monitorizações devem ser realizadas de preferência no mês de abril, após o inverno marítimo. Os levantamentos hidro-topográficos deverão ser feitos com um período mínimo de cinco anos ou, se a situação de defesa costeira for considerada grave, anualmente. Levantamentos topográficos devem ter uma periodicidade de três anos, exceto em ações de reabilitação, que deverão ser realizados antes do início dos trabalhos e após a conclusão.

Em suma, os planos de monitorização deverão contemplar a observação dos seguintes danos (IHRH/FEUP, 2010): blocos deslocados ou danos na superestrutura; danos no manto exterior; danos no manto intermédio; danos na banquetas; danos no talude de tardo; danos nas extremidades da estrutura; evidências de infra-escavação; evidências de galgamentos na marginal; e evidências de colapsos no terrapleno.

3

GALGAMENTOS

3. GALGAMENTOS

Este capítulo pretende descrever as metodologias de cálculo adotadas de forma a ser possível estimar a frequência de galgamentos de obras longitudinais aderentes, tendo como base o clima de agitação marítima e as principais características geométricas da estrutura.

3.1. Fenómenos de propagação de ondas

Ao interagir com fronteiras sólidas naturais e artificiais, como os fundos, as praias ou as estruturas portuárias e de defesa costeira, as ondas sofrem diversos fenómenos de alteração e deformação durante a sua propagação. Um bom conhecimento destes fenómenos de propagação possibilita a obtenção das características de agitação marítima locais, permitindo o uso de registos de boias ondógrafo localizadas ao largo para o estudo de casos específicos ao longo da costa. Em relação a este trabalho, pretende-se obter as características de onda incidentes em obras longitudinais aderentes de forma a permitir a estimativa da frequência de galgamentos.

3.1.1. Empolamento

O empolamento está sempre presente no processo de propagação das ondas e é caracterizado pela alteração da altura (H) e período de onda (T) à medida que se verifica a variação da celeridade de onda (c). Assumindo que a propagação de uma onda se dá com direção constante e que se trata de um sistema fechado em que não existe dissipação de energia (E), o fluxo de energia (F) de uma onda é constante:

$$F = Ec = \frac{1}{8}\rho g H^2 c = \text{constante} \quad (1)$$

Ora, quanto menor for a profundidade do fundo (d), maior será o efeito de atrito entre o fluido e o fundo na velocidade de propagação da onda, resultando numa menor celeridade:

$$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2)$$

Onde k representa o número de onda, segundo a teoria linear de *Airy*:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3)$$

O comprimento de onda (L) é calculado através da equação implícita 4, obtida através das equações 2 e 3:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (4)$$

Como o fluxo de energia é constante, a redução da celeridade de onda corresponde diretamente ao aumento da sua altura. O coeficiente de empolamento (k_s) pode ser estimado por:

$$k_s = \frac{\cosh(kd)}{\sqrt{kd + \sinh(kd) + \cosh(kd)}} \quad (5)$$

3.1.2. Refração

Admitindo uma batimetria do fundo regular, se a direção de propagação das ondas para zonas de menor profundidade for diferente da direção normal às curvas batimétricas, a profundidade de fundo ao longo da crista da onda será variável. Desta forma, a parte da crista que ainda está a maior profundidade apresenta maior celeridade em relação à parte menos profunda, pelo que a onda tenderá a deformar-se e a alinhar com as curvas batimétricas. Este fenómeno resulta numa alteração da direção de propagação da ondulação e repercute-se também na altura de onda, sendo aplicável a lei de *Snell* (equação 6).

$$\frac{\sin(\alpha)}{c} = \frac{\sin(\alpha_0)}{c_0} \quad (6)$$

Os ângulos entre as ortogonais à batimetria e as direções de propagação das ondas ao largo e no local após refração, α_0 e α respetivamente, estão representados na Figura 14.

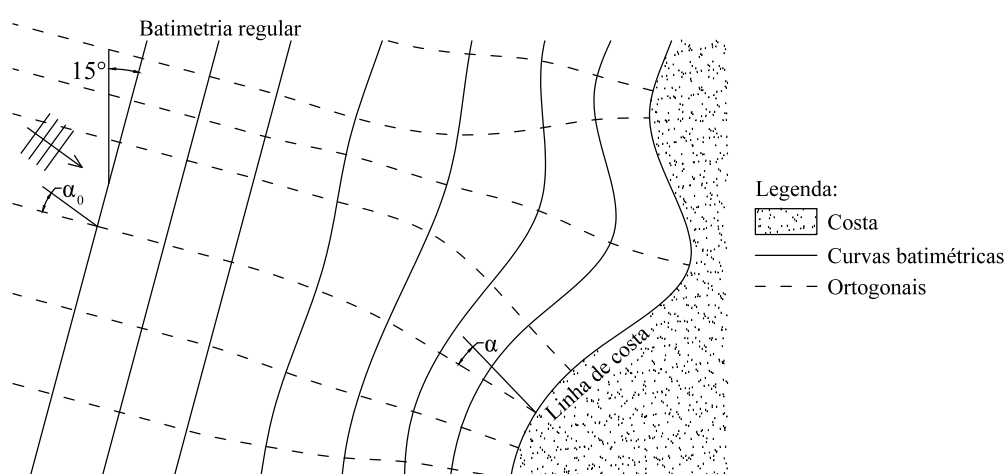


Figura 14 – Esquema da variação da direção de propagação das ondas devido ao fenómeno de refração.

O valor de α é sempre menor ou igual que α_0 , verificando-se uma aproximação da direção de propagação às ortogonais da batimetria. Importa notar que, na avaliação do caso de estudo foi considerada genericamente que a linha de costa e a batimetria regular apresentam uma inclinação de 15° com o norte no sentido horário, representando em termos médios o trecho costeiro entre Espinho e São Jacinto (Figura 14).

Sendo válida a lei de *Snell*, o coeficiente de refração é dado por:

$$k_r = \sqrt{\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha)}} \quad (7)$$

Ao largo, o atrito entre a água do mar e o fundo têm pouca influência na velocidade de propagação das ondas, pelo que a celeridade de onda ao largo (c_0) depende apenas das grandezas da onda – período (T_0) e comprimento de onda ao largo (L_0):

$$\begin{cases} c_0 = \frac{L_0}{T_0} \\ T_0 = \sqrt{\frac{2\pi L_0}{g}} \end{cases} \Rightarrow c_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} \quad (8)$$

Coelho (2005) analisou a relação entre as alturas de onda significativa e os respetivos períodos de onda (Figura 15) de todos os registos da boia ondógrafo de Leixões existentes à data (boia localizada mais próximo da área de estudo, cuja caracterização é detalhada no subcapítulo 5.2).

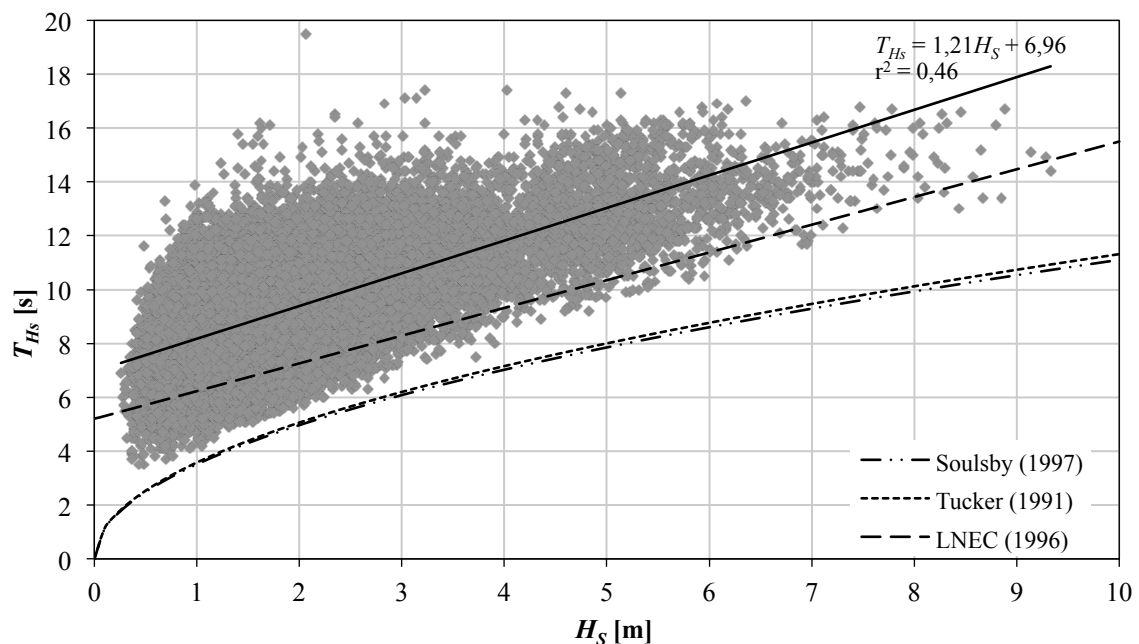


Figura 15 – Relação entre alturas de onda significativa e respetivos períodos de onda, a partir dos dados do Instituto Hidrográfico para a boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003 (Coelho, 2005).

Embora a nuvem de pontos obtida seja dispersa e não seja possível obter uma função de aproximação entre períodos e alturas de onda com elevado fator de correlação, das diversas formulações analisadas (regressão linear, regressão logarítmica, expressões sugeridas por Tucker, 1991, LNEC, 1996 e Soulsby, 1997), a expressão que melhor se ajusta à nuvem de pontos é a seguinte:

$$T_{H_s} = 1,21H_s + 6,92 \quad (9)$$

Assumindo que α_0 apresenta ângulos compreendidos entre 0 e 60° e que, por efeito de refração das ondas, α toma valores até 20° inferiores a α_0 , verifica-se que o coeficiente de refração varia entre 0,8 e 1,0 (Figura 16).

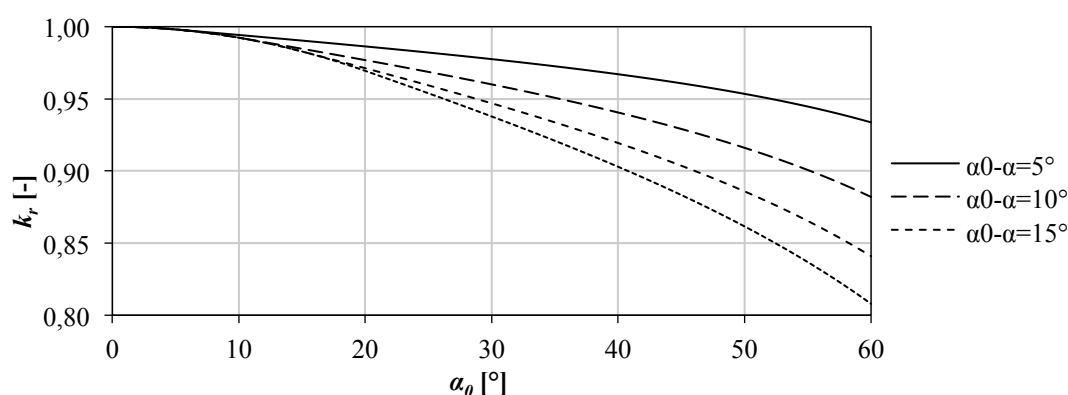


Figura 16 – Variação do coeficiente de refração em função dos ângulos entre as ortogonais à batimetria e as direções de propagação das ondas ao largo (α_0) e após refração (α).

Para esses valores de coeficiente de refração, aplicando a equação 9 e comparando os períodos correspondentes às alturas de onda refratadas com os períodos de onda não refratada, constata-se que a variação de período de onda (ΔT) por refração é sempre inferior a 13% (Figura 17).

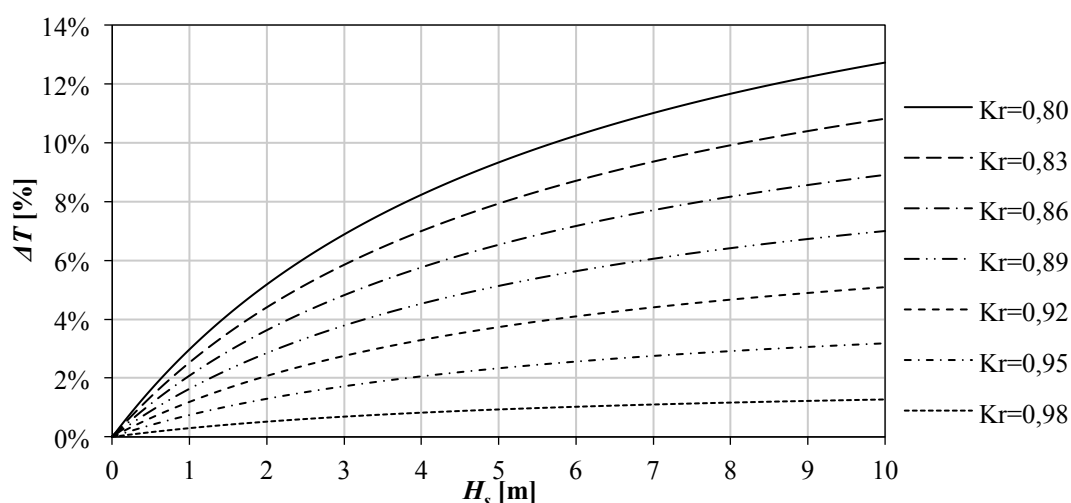


Figura 17 – Variação do período de onda devido à refração, em função da altura de onda significativa.

Constata-se então que a variação do período de onda tem baixa influência na aplicação da lei de Snell. Assim, é possível aligeirar o processo de cálculo dos ângulos entre a direção de propagação da onda e a ortogonal às curvas batimétricas (α). Desprezando a variação de período de onda no fenómeno de refração, obtém-se a expressão 10, usada no presente trabalho.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin(\alpha)}{L/T} = \frac{\sin(\alpha_0)}{L_0/T_0} \\ T \approx T_0 \end{array} \right. \Rightarrow \alpha \cong \sin^{-1} \left(\frac{L \sin(\alpha_0)}{L_0} \right) \quad (10)$$

$$L_0 = \frac{g T_{hs}^2}{2\pi} \quad (11)$$

3.1.3. Altura de onda incidente

O fenómeno de galgamento ocorre quando a cota de espraçamento de uma onda é superior à cota de coroamento da obra longitudinal aderente. Com o objetivo de identificar situações de galgamento, através de comparação da altura de onda incidente na estrutura aderente e o respetivo nível de espraio máximo, procedeu-se ao cálculo exaustivo das alturas de onda incidentes sobre as obras longitudinais aderentes correspondentes a todos os registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões existentes. Para tal, foi feita a contabilização dos dois fenómenos de propagação de onda descritos: empolamento e refração. Este processo de cálculo foi efetuado para profundidades de fundo (d) até 10m inclusive, admitindo que as ondas marítimas assumem comportamento linear sinusoidal.

Para cada registo e profundidade de fundo, a partir da altura de onda significativa ao largo (H_s), do período correspondente à altura significativa (T_{Hs}) e da direção média associada ao período de pico (T_{hTp}), calcularam-se os coeficientes de empolamento e refração, permitindo obter as alturas de onda incidente (H_i) relativas às diferentes profundidades de fundo em análise (equação 12).

$$H_i = H_s k_s k_r \quad (12)$$

Em que:

k_s – coeficiente de empolamento [–], obtido a partir da expressão 5;

k_r – coeficiente de refração [–], obtido a partir da expressão 7.

O fenómeno da refração apenas foi tido em conta nos registos de agitação com informação sobre a direção de propagação (2/3 dos anos com registos).

3.2. Espraçamento

Sucintamente, o espraçamento de uma onda é o movimento ascendente do seu volume de água através da face de uma estrutura de defesa costeira. Segundo Eurotop (2007) designa-se por altura de espraçamento ($R_{2\%}$) a cota medida verticalmente a partir do nível médio da água do mar (NMM) que é excedida por 2% das ondas incidentes. Esta cota depende da declividade de onda, do nível da superfície da água do mar, da batimetria de fundo e da porosidade, rugosidade, permeabilidade e inclinação do manto resistente da obra de defesa costeira. A avaliação do limite de espraçamento das ondas não segue um processo de cálculo consensual. Existem para esse efeito diversas formulações de carácter empírico, para diferentes campos de aplicação e tipos de ondulação.

Teixeira (2014) fez uma análise e categorização exaustiva de 60 formulações distintas, das quais 23 são aplicáveis a estruturas costeiras. Embora tenha verificado uma grande dispersão de resultados das formulações de cálculo de espraio excedido por 2% das ondas, baseando-se em características das estruturas costeiras existentes na costa Noroeste portuguesa e em relações entre os diferentes níveis de espraio estipuladas por Grune e Wang (2000), estabeleceu a relação entre diferentes níveis de espraio e os níveis de espraio máximo ($R_{máx}$). Obteve por regressão linear a expressão 13, aplicável a estruturas costeiras e dependente da declividade da onda e da inclinação do manto resistente da estrutura (β).

$$R_{máx} = 0,41H_s\zeta \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} \quad (14)$$

Foi aplicada a equação 13 para o cálculo da altura de espraçamento correspondente a todos os registos de agitação marítima existentes: altura de onda significativa (H_s) e comprimento de onda ao largo (L_0) correspondente. Considerou-se, por defeito, uma inclinação do manto resistente igual a 2/3 [V/H], pelo que todos os resultados presentes no capítulo 6 e nos subcapítulos 3.3 e 8.2 são referentes a obras longitudinais aderentes com essa inclinação de talude.

3.3. Galgamentos

A contabilização dos registos de agitação que dão origem a galgamento foi feita a partir das seguintes condições: o nível de espraio máximo ($R_{máx}$) deverá ser superior à diferença

(ΔH) entre a cota de coroamento da obra aderente e o nível da superfície livre do mar (NMM); a altura de onda incidente (H_i) deverá ser inferior ou igual à altura de rebentação (H_b) correspondente à profundidade em análise. A última condição referida poderá não representar uma situação real, na medida em que, em termos práticos equivale a considerar que, independentemente da sua altura, todas as ondas já rebentadas que incidem na obra longitudinal aderente não causam galgamento da estrutura.

Admitiu-se que a altura de rebentação é determinada através do índice de rebentação adimensional de McCowan (1891), igual a 0,78 (equação 15).

$$\frac{H_b}{d} \cong 0,78 \quad (15)$$

Desta forma é possível determinar o número e percentagem de registos de agitação e dias de cada mês que representam situação de galgamento, para cada profundidade de fundo d e desnível ΔH .

Com o objetivo de identificar a profundidade máxima que condiciona o número de situações de galgamento, foi também considerada a situação em que a profundidade de fundo é tal que não influencia a rebentação da onda ($d = \infty$), ou seja, assumindo que não há rebentação antes de atingir a estrutura. Assim, sempre que os resultados de uma profundidade de fundo igualam os correspondentes sem influência do fundo, significa que essa profundidade não condiciona a rebentação das ondas desse mês, nem a frequência de galgamentos contabilizados. A Tabela 1 exemplifica a estrutura adotada para a contabilização de situações de galgamento de obras longitudinais aderentes.

Tabela 1 – Estrutura genérica adotada para a contabilização de situações de galgamento de obras longitudinais aderentes, a partir dos dados de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões.

Ano	Mês	ΔH	$d = 1\text{m}$...				$d = 10\text{m}$				$d = \infty$			
			Registos		Dias		Registos		Dias		Registos		Dias		Registos		Dias	
			n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%
1981 a 2014	Janeiro	2m																
		...																
		10m																
	...																	
	Dezembro	2m																
		...																
		10m																

Em relação à representatividade dos valores percentuais, importa notar que as percentagens de dias com galgamentos foram calculadas em relação ao número de dias

com registos de agitação e não em relação ao número total de dias de cada mês. Desta forma, considera-se que os dias com registos de agitação são representativos dos que não têm qualquer registo, ao invés de admitir que quando não existem registos, não há galgamentos. Analogamente, sempre que um mês não apresentasse qualquer registo de agitação marítima, este era excluído do cálculo de médias ou percentagens anuais. No entanto, por si só, estas duas suposições podem deturpar significativamente os resultados obtidos se não houver um critério de validação de dados que imponha um mínimo relativo de registos diários e mensais necessário para considerar válido os resultados obtidos.

Foram analisados três diferentes mínimos relativos de registos: 75%, 66% e 50%. Aplicaram-se esses critérios de validação a todos os meses e anos com registos de agitação marítima e obtiveram-se médias anuais e totais e respetivos desvios padrão dos registos de agitação considerados como válidos. A Figura 18 apresenta a variação do desvio padrão das frequências de galgamentos calculadas em cada mínimo relativo de registos de agitação. Verifica-se que a partir de profundidades de fundo iguais a 4m, o mínimo de 75% dos registos apresenta, em termos médios, resultados com menor dispersão. O mesmo não se observa para profundidades de fundo até 4m, sendo este o critério com menor redução de desvio padrão (diferença mínima de 10%). Apesar de, em termos de dispersão de resultados, os mínimos de 75% e 66% serem semelhantes, optou-se como condição necessária para validação, a existência de registos em pelo menos 75% dos dias do mês. Do mesmo modo, os resultados médios de um determinado ano só são válidos, se pelo menos 9 dos meses desse ano forem válidos. Desta forma, assegura-se a representatividade dos resultados obtidos e minimiza-se a sua dispersão.

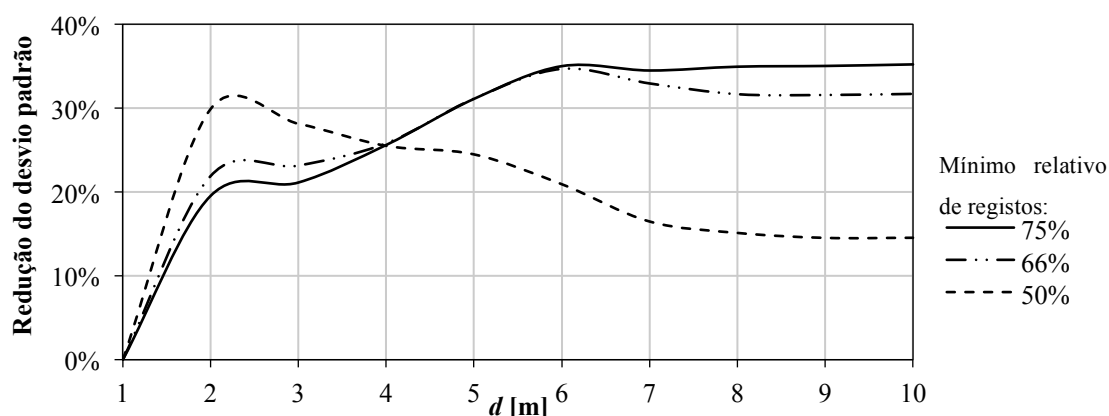


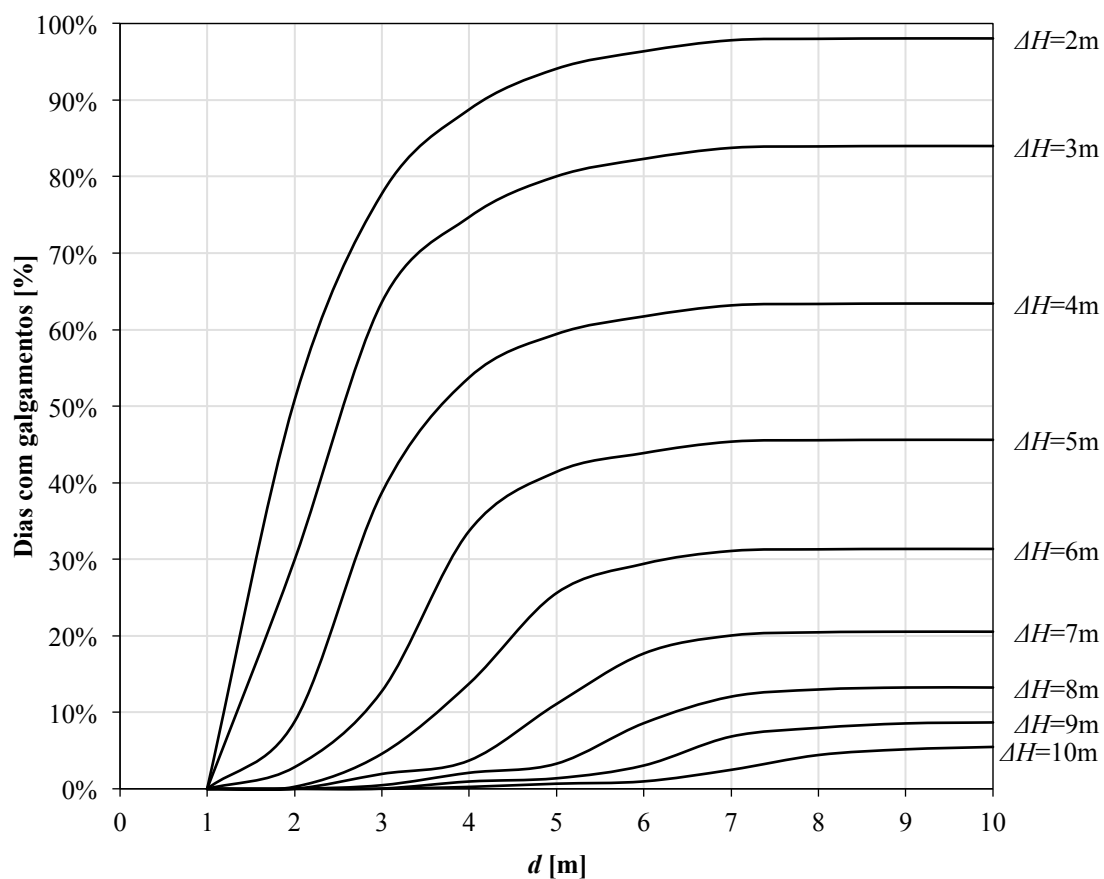
Figura 18 – Redução do desvio padrão médio das frequências de galgamentos, dependendo dos diferentes mínimos relativos de registos considerados (75%, 66% e 50%).

Em suma, são efetivamente analisados 11 anos com registos (46%), com um total de 122 meses (74%), perfazendo uma média de 11 meses válidos por cada ano em análise e um número total de registos de onda de 17111. A Tabela 2 resume o número de meses e anos considerados válidos para os três diferentes mínimos relativos.

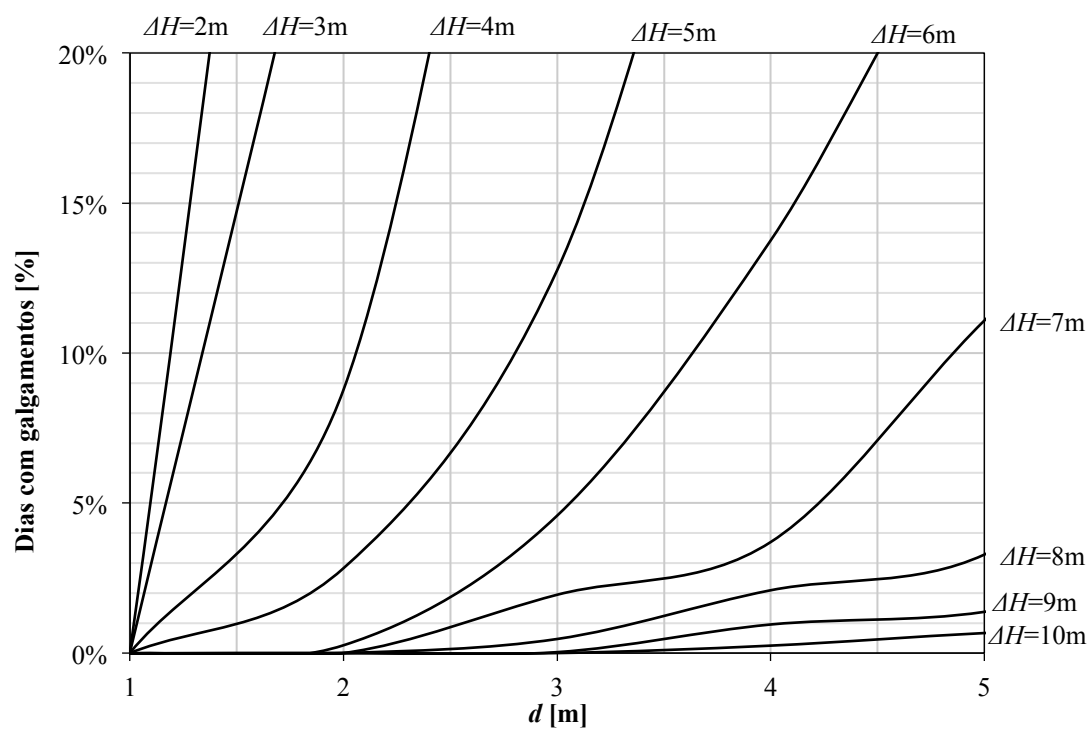
Tabela 2 – Critérios de validação dos registos de agitação mensais/anuais da boia ondógrafo de Leixões.

Ano	N.º de meses válidos	N.º de registos	
1981	3	721	Ano não válido
1982	12	2669	Ano válido
1983	2	685	Ano não válido
1984	12	2681	Ano válido
1985	0	136	Ano não válido
1993	1	435	Ano não válido
1994	3	1502	Ano não válido
1995	0	178	Ano não válido
1996	8	1799	Ano não válido
1997	7	1750	Ano não válido
1998	10	2469	Ano válido
1999	10	2719	Ano válido
2000	4	1045	Ano não válido
2001	5	1443	Ano não válido
2002	9	2453	Ano válido
2003	3	3023	Ano não válido
2004	3	15768	Ano não válido
2005	4	13790	Ano não válido
2009	12	2646	Ano válido
2010	11	2573	Ano válido
2011	12	2723	Ano válido
2012	11	2680	Ano válido
2013	12	2823	Ano válido
2014	11	2796	Ano válido

Com os resultados nos períodos válidos, para cada desnível (ΔH) entre a cota de coroamento da defesa aderente e o nível da superfície livre do mar, é possível representar a média aritmética da percentagem anual de dias com galgamentos em função da profundidade de fundo à frente da obra longitudinal aderente (d), obtendo-se os gráficos da Figura 19.



a) $0 \leq d \leq 10$; $\%_{\text{máx}} = 100\%$



b) $1 \leq d \leq 5$; $\%_{\text{máx}} = 20\%$

Figura 19 – Curvas para estimativa da percentagem anual de dias com galgamentos, para diferentes cenários de d e ΔH .

Aquando da aplicação destas curvas, para estimar frequências de galgamentos em obras aderentes, importa ter em conta que as mesmas são baseadas unicamente nos registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões e optimizadas para obras aderentes com inclinação do manto resistente igual a $2/3 [V/H]$ e batimetria regular cujas curvas de nível apresentam uma orientação de 15° com o norte. Importa também notar que, para além da incerteza associada à estimativa do limite de espraimento e às simplificações de cálculo adotadas, existe uma dispersão de resultados considerável quando comparados anualmente. A Figura 20 representa os desvios padrão (σ) dos valores anuais das percentagens de dias com galgamento calculadas (equação 16), cujo máximo é cerca de 15% para uma profundidade de fundo (d) igual a 2m e desníveis (ΔH) inferiores ou iguais a 4m.

$$\sigma = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (16)$$

A agitação marítima não é constante ao longo do tempo, mas, em termos de comparação anual de períodos homólogos, o esperado é que em termos médios não existam variações significativas, mesmo tendo em consideração as mudanças climáticas. Os valores da Figura 20 representam exatamente isso: quantificam a disparidade de resultados obtidos nos diversos anos em análise. Pelo facto da média dos desvios padrão não ultrapassar os 6 pontos percentuais, poderá dizer-se de uma forma genérica que, embora seja diferente todos os anos, em termos médios a agitação marítima é pouco variável. Desta forma, o erro associado à variabilidade da agitação marítima, induzido no cálculo das percentagens anuais de dias com galgamentos, será diluído em análises de longo prazo.

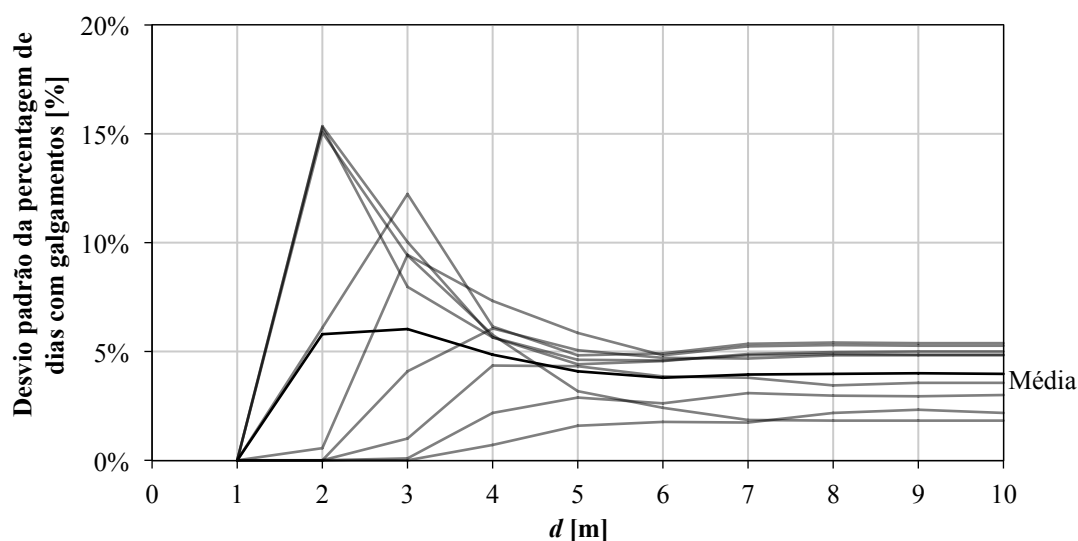


Figura 20 – Desvios padrão das percentagens anuais de dias com galgamentos calculadas.

EVOLUÇÃO DO PERFIL DE PRAIA

4. EVOLUÇÃO DO PERFIL DE PRAIA

Como se concluiu no capítulo anterior, a frequência de galgamentos de uma obra longitudinal aderentes está diretamente interligada com a profundidade de fundo à face da estrutura. Portanto, a previsão de evolução da frequência de galgamentos ao longo do tempo está intrinsecamente associada ao estudo do comportamento do perfil de praia. Pretende-se com este capítulo identificar os fatores que induzem uma tendência de abaixamento do perfil de praia e estimar a profundidade máxima de erosão com base na análise de diversas propostas existentes na literatura. É feita uma análise de sensibilidade e uma análise estatística das formulações que melhor se adequam às características do litoral Noroeste Português, obtendo-se uma expressão que permite agilizar o processo de cálculo associado à estimativa da profundidade máxima erodível do perfil de praia.

4.1. Causas do abaixamento do perfil de praia

A reflexão das ondas incidentes, cujo refluxo depende da inclinação, rugosidade e permeabilidade do manto resistente, dá origem a transporte sedimentar para maiores profundidades. Este fenómeno, conjugado com o eventual défice sedimentar associado às correntes de deriva longitudinal, reduz a quantidade de sedimentos na zona frontal à obra longitudinal aderente. Assim, estes processos induzem uma tendência para ocorrer o abaixamento do perfil de praia na zona frontal às obras longitudinais aderentes. Consequentemente, o aumento da profundidade do fundo permite a aproximação de ondas de maior altura e a incidência de ondas mais energéticas nas defesas aderentes, originando maiores e mais frequentes galgamentos.

O aumento da frequência e gravidade dos eventos de dano e a necessidade de ações de manutenção de maior dimensão, implica que os custos relativos aos impactos e manutenção da obra de defesa costeira aumentem exponencialmente ao longo do tempo. Um bom conhecimento dos mecanismos de evolução do perfil de praia em zonas de implementação de obras longitudinais aderentes é, por isso, essencial à previsão de situações passíveis de ocorrer galgamentos e danos materiais e à estimativa de custos associados. Por outro lado, a adoção de medidas de intervenção para reduzir galgamentos de obras longitudinais aderentes deve ser fundamentada com base não só na eficiência da intervenção na redução de galgamentos, mas também na previsão da evolução dos custos e impactos associados ao abaixamento do perfil de praia.

4.2. Metodologias de cálculo

Várias propostas têm sido desenvolvidas no sentido de prever a evolução do perfil de praia ao longo do tempo, e qual seria a profundidade máxima de erosão no perfil de praia em frente a estruturas aderentes à costa ($S_{m\acute{a}x}$), dependendo de parâmetros de agitação marítima (altura de onda, comprimento de onda e período), profundidade do fundo à face da estrutura ou na zona de rebentação, tamanho dos sedimentos e velocidades críticas e máximas de transporte sedimentar. Não obstante, grande parte das formulações existentes são referentes a muros de retenção, não existindo ainda metodologias consensuais de cálculo da profundidade máxima de erosão aplicáveis a estruturas longitudinais aderentes. Segundo Burcharth e Hughes (2011a), como os índices de reflexão de um muro com paramento vertical são superiores aos de uma obra aderente, a previsão da profundidade erodível pode ser feita admitindo que a obra é um muro.

Foi analisado um conjunto de formulações distintas, obtidas a partir de ensaios em modelos físicos experimentais e/ou recorrendo a modelação numérica: Herbich e Ko (1968), Song e Schiller (1973), Jones (1975), Xie (1981, 1985)/Sumer e Fredsøe (2000), CERC (1984), Hughes e Fowler (1991), Fowler (1992), Powell e Lowe (1994), McDougal *et al.* (1996), Powell e Whitehouse (1998) e O'Donoghue (2001). Cada formulação apresenta uma aplicabilidade distinta, variando o tipo de agitação marítima em ensaio, as características da rebentação das ondas, a constituição e inclinação média do perfil de praia e o tipo de obra de defesa costeira em análise. Com base em Sutherland *et al.* (2005), o presente sub-capítulo pretente explicitar sucintamente as principais características de cada uma das formulações supracitadas, incluindo a sua aplicabilidade, procedimentos experimentais e observações relevantes.

4.2.1. Song e Schiller (1973)

Song e Schiller (1973) obtiveram uma formulação logarítmica que relaciona a profundidade máxima de erosão relativa ($S_{m\acute{a}x}/H_0$) com as características de onda e a distância à zona de rebentação. Esta formulação permite estimar a profundidade de erosão máxima em função da distância medida na perpendicular à linha de costa.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Fundos arenosos;
- Muros verticais.

Limites de aplicabilidade:

- $0,5 < X/X_b < 1,0$ (Powell, 1987)
- $0,67 < X/X_b < 1,38$ (Fowler, 1992)

Formulação:

$$\frac{S}{H_o} = 1,94 + 0,57 \ln\left(\frac{X}{X_b}\right) + 0,72 \ln\left(\frac{H_o}{L_o}\right) \quad (17)$$

Procedimento experimental:

A expressão foi obtida a partir de ensaios em modelo à escala reduzida: $0,20 \times 0,33 \times 12,2 \text{ m}^3$. Os testes foram realizados usando ondas regulares com três diferentes períodos (0,8s, 1s e 1,3s) e sedimentos arenosos com d_{50} igual a 0,17mm. O perfil de praia inicial correspondeu ao perfil estabilizado após 48h sob a influência das ondas sem o muro.

Observações:

O modelo experimental apresenta dimensões que não permitem uma análise tridimensional do processo erosivo da praia. A formulação não tem em conta o fator de refletividade da estrutura de defesa costeira, nem o tamanho relativo dos sedimentos.

4.2.2. Jones (1975)

A expressão desenvolvida por Jones (1975) é empírica e, tal como a expressão de Song e Schiller (1973), permite estimar a profundidade máxima de erosão em função da distância à linha de costa, partindo da distância à zona de rebentação e da altura da onda na rebentação.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Rebentação progressiva e mergulhante;
- Fundos arenosos com inclinação nula;
- Muros verticais.

Limites de aplicabilidade:

- $X_r/X_b < 1$

Formulação:

$$\frac{S_{\max}}{H_b} = 1,60(1 - X_r/X_b)^{2/5} \quad (18)$$

Procedimento experimental:

Esta expressão empírica baseia-se na teoria linear de ondas, assumindo que a tensão tangencial no fundo provocada pela ondulação varia linearmente desde o valor máximo no instante de rebentação até ao valor nulo no limite de espraçamento. A profundidade de erosão máxima é obtida a partir da diferença entre as profundidades de fundo final e inicial calculadas na base do muro, considerando que a inclinação do perfil de praia é nula e que o coeficiente de reflexão do muro é igual a 1.

Observações:

De acordo com Sutherland *et al.* (2005), a aplicação desta formulação é limitada, visto ser admitido que o muro é infinitamente extenso e reflete as ondas sem dissipação de energia. Além disso, a assunção da variação linear da tensão tangencial é demasiado simplista. A profundidade de erosão é nula quando $X_r/X_b = 1$, ou seja, não existe erosão quando a estrutura de defesa costeira está localizada na zona de rebentação, o que, de acordo com CERC (1984), contradiz vários outros estudos realizados, alguns deles até considerando que a zona de rebentação corresponde à máxima profundidade erodível.

4.2.3. Xie (1981, 1985)/Sumer e Fredsøe (2000)Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Ondulação regular e irregular;
- Ondulação não rebentada;
- Fundos arenosos com inclinação nula;
- Areias finas em transporte por suspensão;
- Areias grossas em transporte por arrastamento;
- Muros verticais ou inclinados.

Limites de aplicabilidade:

- $0 \leq S_{máx}/H_i \leq 1$
- $0,05 \leq H_i/L_i \leq 0,20$

Transporte por suspensão: $\frac{(u_{máx} - u_{cr})}{\omega} \geq 16,5$

Transporte por arrastamento: $\frac{(u_{máx} - u_{cr})}{\omega} < 16,5$

Sendo: $u_{máx} = \frac{\pi H}{T \sinh(k\bar{d})}$ (19)

Formulação:

$$\frac{S_{máx}}{H_i} = \frac{C}{[\sinh(kd)]^{1,35}} \quad (20)$$

Onde:

$C = 0,4$ – Areias finas transportadas por suspensão;

$C = 0,3$ – Areias grossas transportadas por arrastamento;

$C = 0,3 - 1,77 \frac{\beta}{15}$ – Quebramares de taludes em fundos de areias grossas (Sumer e Fredsøe, 2000)

Procedimento experimental:

A expressão foi obtida a partir de ensaios laboratoriais em dois modelos à escala reduzida: $38 \times 0,8 \times 0,6 \text{ m}^3$ e $46 \times 0,8 \times 1,0 \text{ m}^3$. Foram estudados vários regimes de ondulação regular e 3 casos de ondulação irregular, fazendo variar a altura de onda entre 5cm e 9cm, o período de onda entre 1,17s e 3,56s e a declividade de onda entre 8,3% e 37,5%. Realizaram-se ensaios usando 4 diferentes diâmetros de sedimentos: 0,106mm; 0,15mm; 0,20mm e 0,78mm.

Observações:

O facto do coeficiente C contabilizar o efeito da dimensão dos sedimentos do fundo e o seu processo de transporte, permitindo um melhor ajuste da regressão exponencial aos resultados experimentais, representa uma abordagem demasiado simplista.

4.2.4. CERC (1984)

A metodologia aconselhada no volume 1 do *Shore Protection Manual* (CERC, 1984) estima de forma simplista a profundidade máxima de erosão do perfil de praia frontal a estruturas de defesa costeira aderentes à costa como sendo igual à máxima altura de onda não rebentada na zona de fundação da estrutura. Se a altura de onda na rebentação for determinada pela equação 15, a partir do índice de rebentação de McCowan (1891), então a profundidade máxima de erosão estimada por este método depende unicamente da profundidade de fundo inicial. Desta forma, a profundidade de fundo inicial (d_i) e final (d_f) apresentam uma relação linear segundo a seguinte expressão:

$$d_f = \frac{d_i}{0,78} \quad (21)$$

A aplicação desta formulação deve ser cuidada, tendo em conta que não tem em consideração o fator de refletividade da estrutura de defesa costeira, o regime de agitação

marítima e a dimensão dos sedimentos da praia. No entanto, devido à simplicidade da formulação e à facilidade de aplicação, esta torna-se indicada para estimativas grosseiras da grandeza da profundidade máxima de erosão.

4.2.5. Hughes e Fowler (1991)

Esta formulação tem como base a proposta desenvolvida por Xie (1981, 1985). A diferença é o tipo de ondulação usada nos ensaios experimentais, sendo que Hughes e Fowler (1991) submeteram o modelo a ondas irregulares.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Ondulação irregular;
- Ondulação não rebentada;
- Fundos arenosos e com inclinação nula;
- Areias finas em transporte por suspensão;
- Muros verticais.

Limites de aplicabilidade:

- $0,05 < k_p d_i < 3$

Formulações:

$$\frac{S_{máx}}{T_p \cdot (u_{rms})_m} = \frac{0,05}{[\sinh(k \cdot d_i)]^{0,35}} \quad (22)$$

$$(u_{rms})_m = \frac{\sqrt{2} g k_p T_p H_{m0}}{4\pi \cosh(k_p \cdot d_i)} \left[0,54 \cosh\left(\frac{1,5 - k_p \cdot d_i}{2,8}\right) \right] \quad (23)$$

Procedimento experimental:

A expressão foi obtida a partir de ensaios em modelo à escala reduzida de um muro vertical e fundo horizontal arenoso com sedimentos de diâmetro médio igual a 0,13mm (velocidade de queda de 1,64cm/s). Sujeitou-se o modelo a um regime de ondulação irregular com 9cm de altura de onda (H_{m0}), período de pico de 1,26s e profundidade de fundo inicial de 30cm, até o perfil de praia atingir o equilíbrio (aproximadamente 6000 ondas).

Observações:

Segundo Sutherland *et al.* (2005), o uso de ondas irregulares no modelo, faz com que a profundidade máxima de erosão estimada através da expressão 22 seja inferior em cerca de 45% em relação à profundidade erodível prevista pela expressão 20.

4.2.6. Fowler (1992)

A expressão de Fowler (1992) foi desenvolvida com base nos resultados experimentais de Chesnutt e Schiller (1971) e Barnett (1987), embora haja uma grande dispersão de resultados. A representação da profundidade máxima de erosão relativa ($S_{m\acute{a}x}/H_0$) em função da relação entre a profundidade de fundo e o comprimento de onda ao largo (d_i/L_0), permitiu obter a expressão por regressão exponencial.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Rebentação progressiva e mergulhante;
- Fundos arenosos;
- Muros verticais.

Limites de aplicabilidade:

- $-0,011 < d_i/L_0 < 0,045$
- $0,015 < H_0/L_0 < 0,040$
- $0,2 \leq S_{m\acute{a}x}/H_0 \leq 1,0$

Formulação:

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{H_0} = \left(22,72 \frac{d_i}{L_0} + 0,25 \right)^{1/2} \quad (24)$$

Procedimento experimental:

A expressão foi obtida a partir de resultados de ensaios num tanque de 100m de comprimento, com muro vertical em três localizações distintas relativamente ao perfil de praia. O perfil de praia assumia um declive inicial constante de 1:15 e era composto por areia com 0,13mm de diâmetro mediano e velocidade de queda igual a 1,64cm/s. Foram testados 18 diferentes tipos de ondulação irregular e 4 ondas regulares com duração suficiente para ser atingido o perfil de equilíbrio.

Observações:

No seguimento das conclusões de McDougal *et al.* (1996), a expressão desenvolvida por Fowler faz variar de forma inversa a profundidade máxima de erosão relativa ($S_{m\acute{a}x}/H_0$) com o comprimento de onda ou período de onda ao largo, o que implica que maiores declividades de onda ($= H/L$) resultem em profundidades de erosão superiores, facto este que não se verifica nas restantes formulações existentes para determinação da profundidade de erosão em frente a estruturas aderentes.

4.2.7. Powell e Lowe (1994)

Powell e Lowe (1994) desenvolveram vários ábacos (sendo um deles apresentado na Figura 21) de previsão da profundidade máxima de erosão relativa a partir de ensaios experimentais com perfis de praia inclinados com fundos constituídos por areias grosseiras, analisando tanto muros verticais e inclinados, como obras longitudinais aderentes compostas por enrocamento.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Rebentação progressiva e mergulhante;
- Fundos constituídos por seixos rolados;
- Muros verticais e inclinados;
- Obras longitudinais aderentes com manto resistente composto por enrocamento.

Limites de aplicabilidade:

- $5\text{mm} < d_{50} < 30\text{mm}$
- $H_{bm\acute{a}x}/L_m \leq 0,06$
- $-3 \leq d_i/H_{bm\acute{a}x} \leq 4$

Formulação:

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{H_0} = f\left(\frac{d_i}{H_{bm\acute{a}x}}, \frac{H_{bm\acute{a}x}}{L_m}\right) \quad (25)$$

Em que:

$S_{m\acute{a}x}/H_{bm\acute{a}x}$ – profundidade máxima de erosão relativa [-];

$d_i/H_{bm\acute{a}x}$ – profundidade de fundo relativa [-];

$H_{bm\acute{a}x}/L_m$ – declividade da onda não rebentada [-].

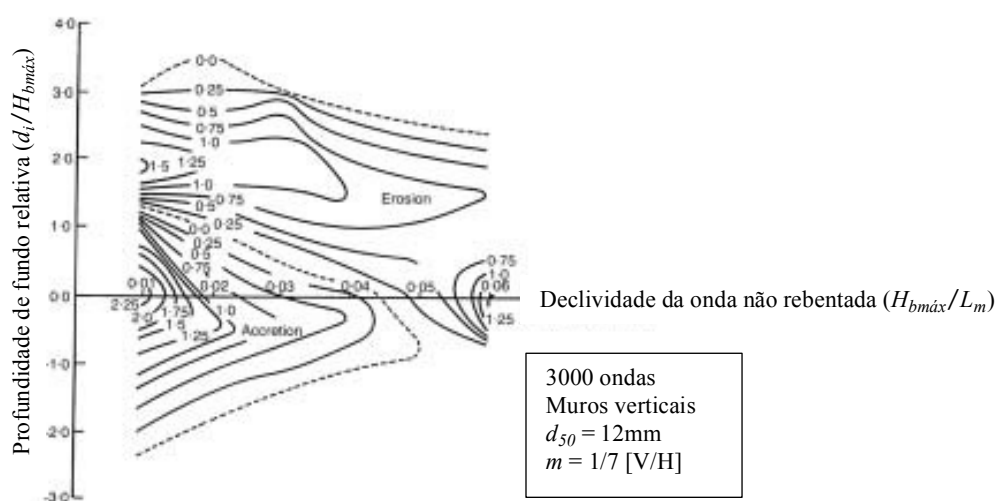


Figura 21 – Curvas paramétricas da profundidade máxima de erosão relativa, segundo a metodologia de Powell e Lowe (1994).

A profundidade máxima de erosão relativa é determinada através do ábaco da Figura 21, a partir dos diversos valores de declividade da onda (eixo das abcissas) e da profundidade de fundo relativa correspondente (eixo das ordenadas).

Procedimentos experimentais:

O ábaco foi obtido com base num modelo físico experimental à escala 1:17, usando 20 diferentes espectros de ondas irregulares e 8 diferentes profundidades de fundo iniciais à face do muro. O fundo apresentava uma inclinação inicial constante de 1:7 e era constituído por seixo rolado com diâmetro regular de 12mm.

Observações:

Os ábacos desenvolvidos por Powell e Lowe (1994) são relativos a ensaios experimentais com a duração de exatamente 3000 ondas, visto ser este o período considerado como estabilizador do perfil de praia. Desta forma, deve ser aplicado um fator corretivo para situações em que se estime um número de ondas diferente até à estabilização do perfil, dependendo das condições de agitação e da granulometria dos sedimentos do perfil de praia (*e.g.* Hughes e Fowler, 1991, desenvolveram ensaios semelhantes com areias de granulometria pequena e fundos de inclinação nula, e verificaram que o perfil de praia estabilizava após cerca de 6000 ondas). Foram observados quatro diferentes tipologias de reflexão das ondas, com predominância de um tipo particular aquando da estabilização do perfil de praia e, consequentemente, das condições de onda locais e profundidade de fundo. Assim, Powell e Lowe (1994) conseguiram ainda relacionar o coeficiente de reflexão da estrutura de defesa costeira com a profundidade de fundo relativa.

4.2.8. McDougal *et al.* (1996)

A expressão desenvolvida por McDougal *et al.* (1996) tem como base os dados experimentais de Fowler (1992) e resultados obtidos no modelo numérico SBEACH, modificado de forma a incluir o fenómeno de reflexão das ondas no muro vertical. É de fácil aplicação e, à semelhança da formulação de Herbich e Ko (1968) referida na secção 4.5.1, tem em conta a inclinação do perfil de praia e a dimensão dos sedimentos.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Rebentação progressiva e mergulhante;
- Fundos arenosos;
- Muros verticais.

Formulação:

$$\frac{S_{máx}}{H_0} = 0,41 m^{0,85} \left(\frac{L_0}{H_0} \right)^{1/5} \left(\frac{d_i}{H_0} \right)^{1/4} \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right)^{1/3} \quad (26)$$

Todas as variáveis, à exceção da inclinação do perfil de praia, têm como unidade o metro.

Observações:

Verifica-se que a profundidade de erosão aumenta com a inclinação do perfil de praia, o que vai ao encontro do que já era expectável. Maiores inclinações médias do perfil de praia resultam em larguras inferiores da zona de rebentação e, dessa forma, concentram as tensões tangenciais no fundo causadas pela rebentação das ondas na zona frontal às estruturas longitudinais aderentes, havendo assim, maiores problemas de erosão na risberma das estruturas.

4.2.9. Powell e Whitehouse (1998)

Powell e Whitehouse (1998) deram continuidade ao trabalho previamente desenvolvido por Powell e Lowe (1994), chegando a diversos ábacos de previsão da profundidade máxima de erosão relativa em fundos de areia fina e de inclinação reduzida, em situações de existência de muros ou de obras longitudinais aderentes.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Rebentação progressiva e mergulhante;
- Fundos arenosos de granulometria fina;
- Muros verticais e inclinados;
- Obras aderentes com manto resistente composto por enrocamento.

Limites de aplicabilidade:

- $0,005 < H_{bmáx}/L_m < 0,075$
- $0 < d_i/H_{bmáx} < 6$

Formulação:

$$\frac{S_{máx}}{H_{bmáx}} = f\left(\frac{d_i}{H_{bmáx}}, \frac{H_{bmáx}}{L_m}\right) \quad (27)$$

Em que:

$S_{máx}/H_{bmáx}$ – profundidade máxima de erosão relativa [–];

$d_i/H_{bmáx}$ – profundidade de fundo relativa [–];

$H_{bmáx}/L_m$ – declividade da onda não rebentada [–].

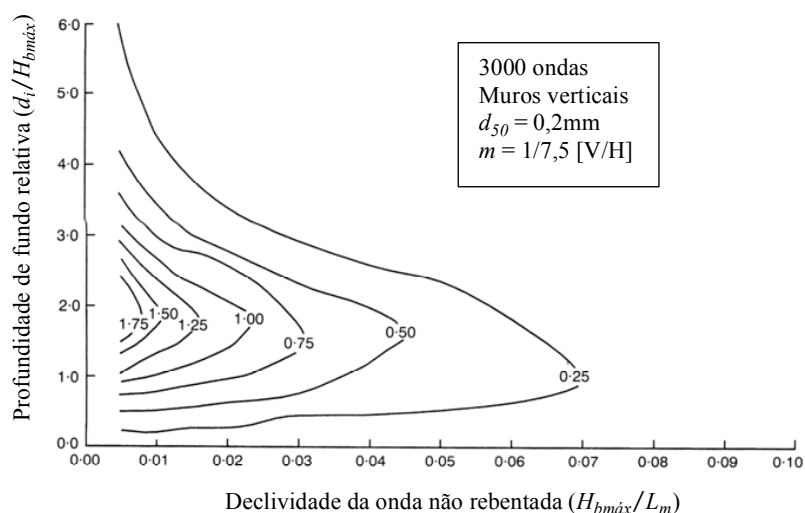


Figura 22 – Curvas paramétricas da profundidade máxima de erosão relativa, segundo metodologia de Powell e Whitehouse (1998).

A profundidade máxima de erosão relativa é determinada através do ábaco da Figura 22, de forma análoga aos ábacos de Powell e Lowe (1994) explicitados na secção 4.2.7.

Procedimento experimental:

O ábaco foi obtido com base em resultados do modelo numérico COSMOS-2D, complementados com dados obtidos no mesmo modelo físico experimental usado por Powell e Lowe (1994). As características do ensaio mantiveram-se as mesmas: escala do modelo 1:17, 20 diferentes espectros de ondas irregulares e 8 diferentes profundidades de fundo iniciais, à exceção da inclinação média do fundo (1:75) e da dimensão dos sedimentos (0,2mm).

Observações:

O programa de modelação numérica COSMOS-2D (Sutherland *et al.*, 2005) foi validado a partir de dados recolhidos de ensaios em modelo à escala no laboratório SUPERTANK e de dados de campo, de Blackpool. Segundo verificaram McDougal *et al.* (1996), este modelo é geralmente incapaz de prever situações de acreção à face da estrutura de defesa costeira, independentemente do nível de maré e das características de onda consideradas. No entanto, experimentalmente constataram situações de acreção em fundos compostos por sedimentos grosseiros, para determinadas combinações de nível de maré e características de onda.

4.2.10.O'Donoghue (2001)

O'Donoghue (2001) desenvolveu uma expressão analítica empírica a partir dos dados experimentais de Xie (1981), fazendo variar a profundidade máxima de erosão verificada experimentalmente com as velocidades teóricas de mobilização de sedimentos junto ao fundo.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Ondulação regular;
- Ondulação não rebentada;
- Fundos arenosos de granulometria grosseira;
- Muros verticais.

Limites de aplicabilidade:

- $\Psi_n > 2$
- $u_n/\omega < 14$
- Distribuição linear do caudal sólido ao longo do perfil de praia

Em que ω é calculado segundo a formulação de Hallermeier (1981).

Formulação:

$$\frac{S_{máx}}{L_s} = \frac{0,16u_{máx}^{2,65}}{0,016 + u_{máx}^{2,65}} \quad (28)$$

Em que $u_{máx}$ é calculado a partir da equação 19.

Observações:

As velocidades de transporte de sedimentos junto ao fundo ao longo da largura do perfil ativo dependem de um vasto conjunto de variáveis associadas à agitação marítima, ao perfil de praia e aos sedimentos constituintes. O seu cálculo pode ser baseado em expressões analíticas obtidas a partir de teorias de onda ou da quantificação das tensões tangenciais no fundo devido à ação conjunta da ondulação e das correntes, existindo uma incerteza associada que aumenta a variabilidade de resultados desta formulação.

4.3. Análises de sensibilidade

De forma a estimar a profundidade máxima de erosão, importa proceder-se a uma escolha das formulações que melhor se adequam ao litoral Noroeste Português a partir de uma análise prévia das condições de aplicabilidade e do conjunto de variáveis requeridas.

Assim, torna-se necessário compreender qual a influência dos diferentes parâmetros envolvidos no cálculo, a partir de um estudo de sensibilidade.

Devido à menor incerteza associada à determinação de parâmetros relacionados com agitação marítima, deu-se maior relevo às formulações dependentes apenas de características de agitação e de profundidades de fundo, aplicáveis a fundos arenosos de granulometria média-fina com rebentação de ondas: CERC (1984); Hughes e Fowler (1991); Fowler (1992); McDougal *et al.* (1996) e Powell e Whitehouse (1998). No âmbito deste trabalho não se estudaram detalhadamente as restantes formulações, visto dependerem da velocidade de transporte junto ao fundo, de características específicas dos sedimentos ou de distâncias à zona de rebentação, o que pressupunha um conhecimento mais detalhado das características locais dos casos de estudo (dados granulométricos, batimetria atual e ao longo do período em análise e transporte sólido por arrastamento e em suspensão).

Uma vez que a altura de onda ao largo é um parâmetro comum em todas as formulações recolhidas, a análise de resultados e das diversas variáveis é feita a partir da representação da profundidade máxima erodida em função da altura de onda significativa ao largo. Sendo assim, para cada altura de onda ao largo, foi calculado o período de onda ao largo a partir da equação 9 e o comprimento de onda ao largo a partir da equação 11. O cálculo das características de agitação marítima incidente na obra longitudinal aderente (período, comprimento e número de onda) seguiu o procedimento descrito anteriormente, no subcapítulo 3.1.

4.3.1. CERC (1984)

O facto desta metodologia não depender de parâmetros de agitação marítima (devido à utilização do índice de rebentação k_b de McCowan, 1891), faz com que a profundidade erodível em função da altura de onda ao largo seja constante, havendo uma variação fixa da profundidade máxima de erosão entre profundidades de fundo iniciais consecutivas (Tabela 3).

Tabela 3 – Profundidade máxima de erosão estimada para profundidades de fundo iniciais até 10m, segundo a metodologia de CERC (1984).

d_i [m]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{máx}$ [m]	0,00	0,28	0,56	0,85	1,13	1,41	1,69	1,97	2,26	2,54	2,82

4.3.2. Hughes e Fowler (1991)

A aplicação desta metodologia obriga ao conhecimento do período de pico (T_p). No sentido de relacionar esse período com qualquer outro parâmetro de agitação marítima, consideraram-se todos os registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões que apresentassem valores de período de pico – 16241 registos entre os anos 2009 e 2014. As regressões lineares do período de pico em função das alturas de onda significativa H_{m0} e H_s apresentam coeficientes de correlação de aproximadamente 0,46. No entanto, quando se avalia a relação do período de pico em função do período de onda associado ao cálculo da altura de onda significativa (T_{Hs}), a regressão linear (equação 29) já apresenta um coeficiente de correlação de 0,76 (Figura 23). Existem na literatura diversas propostas no sentido de relacionar diferentes períodos de onda, das quais se destacam a expressão 30 (Goda, 1974) e a expressão 31 (Eurotop, 2007). Verifica-se que estas expressões não divergem muito da função linear obtida a partir dos registos de agitação marítima de Leixões, pelo que a equação 29 será utilizada no âmbito deste trabalho.

$$T_p = 1,1738T_{Hs} \quad (29)$$

$$T_p = 1,05T_{Hs} \quad (30)$$

$$T_p = 1,10T_e \quad (31)$$

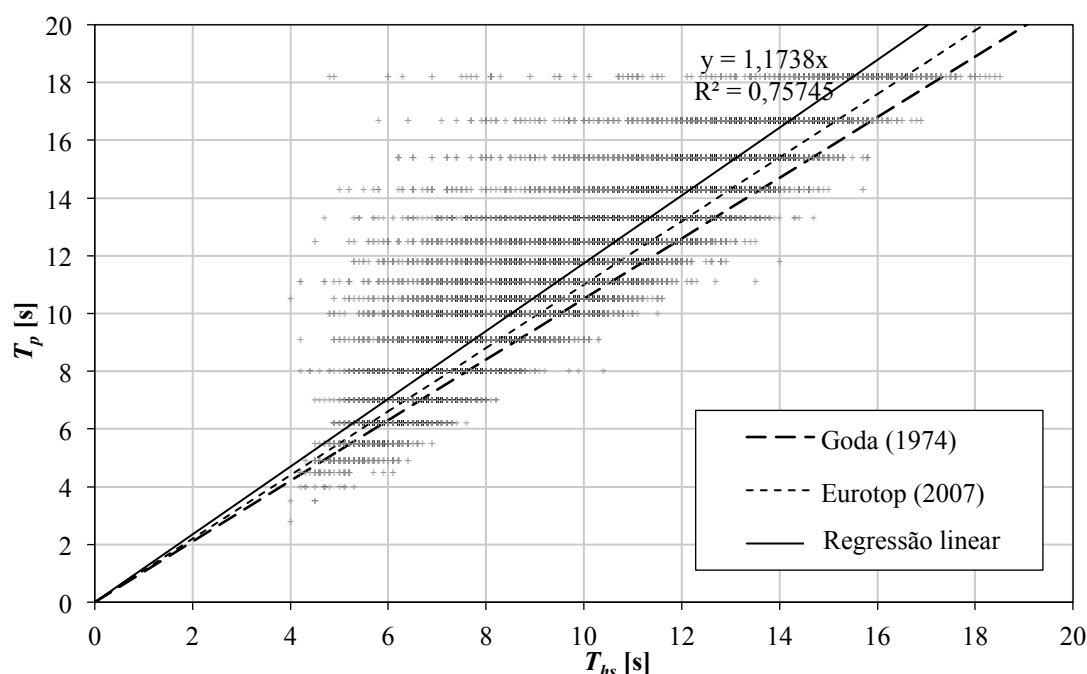


Figura 23 – Relação entre o período de pico e o período de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).

Considerando todas as variáveis da equação 22 dependentes da altura de onda ao largo (H_0) e da profundidade de fundo (d), obtém-se o gráfico da Figura 24.

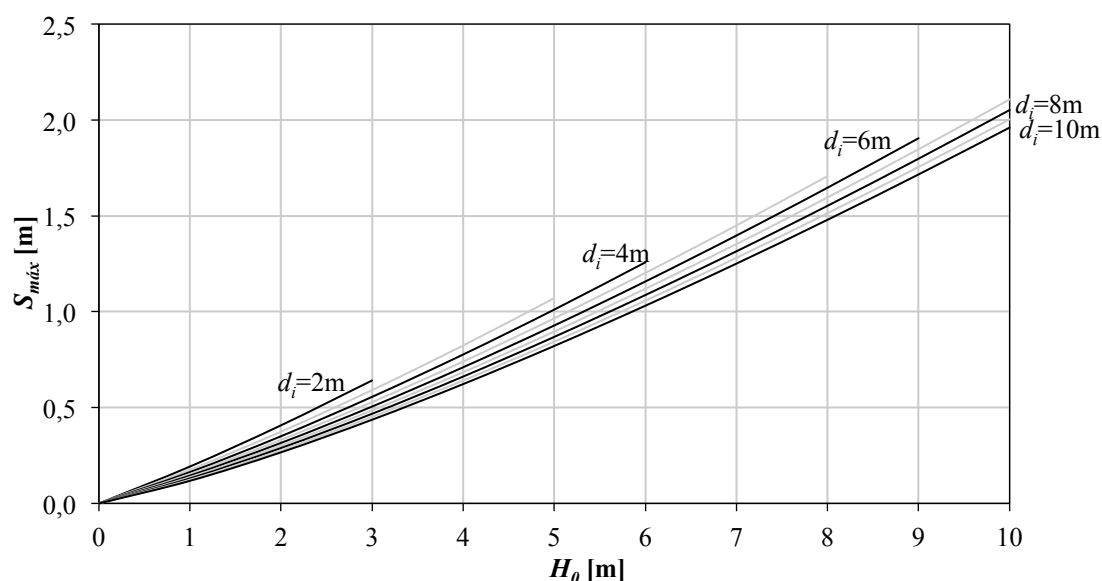


Figura 24 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Hughes e Fowler (1991).

Verifica-se que a diferença de resultados para diferentes profundidades iniciais é mínima (variação média de 5%). Quanto menor é a profundidade de fundo inicial à face da estrutura aderente de defesa costeira, maior é a erosão verificada no perfil de praia.

4.3.3. Fowler (1992)

Na formulação de Fowler (1992), a profundidade erodível apenas depende de parâmetros de agitação marítima ao largo (T_0 e L_0) e da profundidade de fundo inicial. A Figura 25 representa a profundidade máxima de erosão obtida em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais.

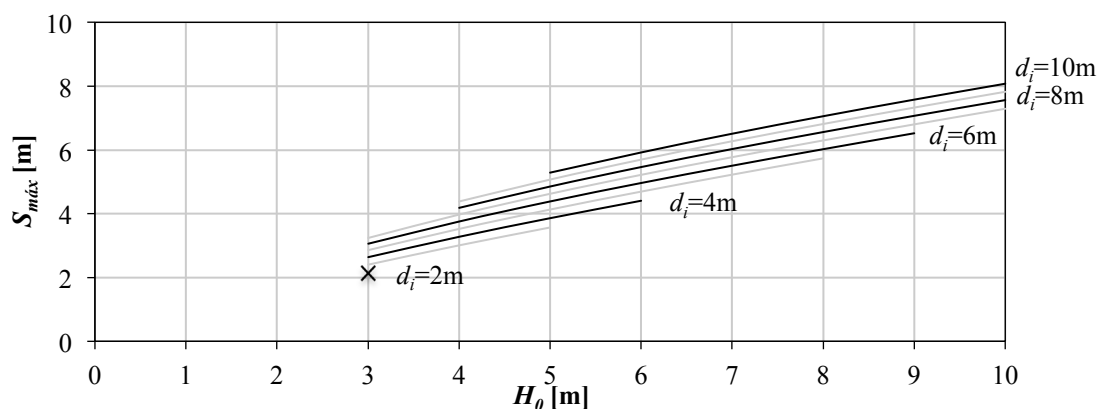


Figura 25 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Fowler (1992).

Contrariamente a Hughes e Fowler (1991), profundidades de fundo iniciais superiores têm associadas maiores profundidades de erosão. Verifica-se também que a grandeza das profundidades de erosão obtidas por esta formulação é superior às outras propostas. Isto deve-se essencialmente ao fator de multiplicação da formulação na equação 24 (igual a 22,72) e ao facto da profundidade erodível variar inversamente com a declividade de onda.

4.3.4. McDougal *et al.* (1996)

Foi feita uma breve análise de sensibilidade a dois dos parâmetros desta formulação: inclinação média do perfil de praia (m) e dimensão mediana dos sedimentos (d_{50}). Para isso, procedeu-se ao cálculo da profundidade máxima de erosão para inclinações médias desde 1% a 10% e diâmetros medianos iguais a 0,3mm, 0,5mm e 0,7mm. De forma a ser expedita e clara a comparação entre inclinações médias, representou-se a profundidade máxima de erosão relativa em função apenas da profundidade de fundo inicial (Figura 26). As curvas correspondem a um diâmetro mediano de 0,5mm e as barras de erro dão o intervalo de valores obtido ao considerar 0,3mm e 0,7mm de diâmetro, sendo que as menores dimensões dos sedimentos correspondem a profundidades de erosão superiores. Para facilitar a leitura do ábaco, representaram-se as barras de erro apenas nas inclinações médias iguais a 1% e a 2%.

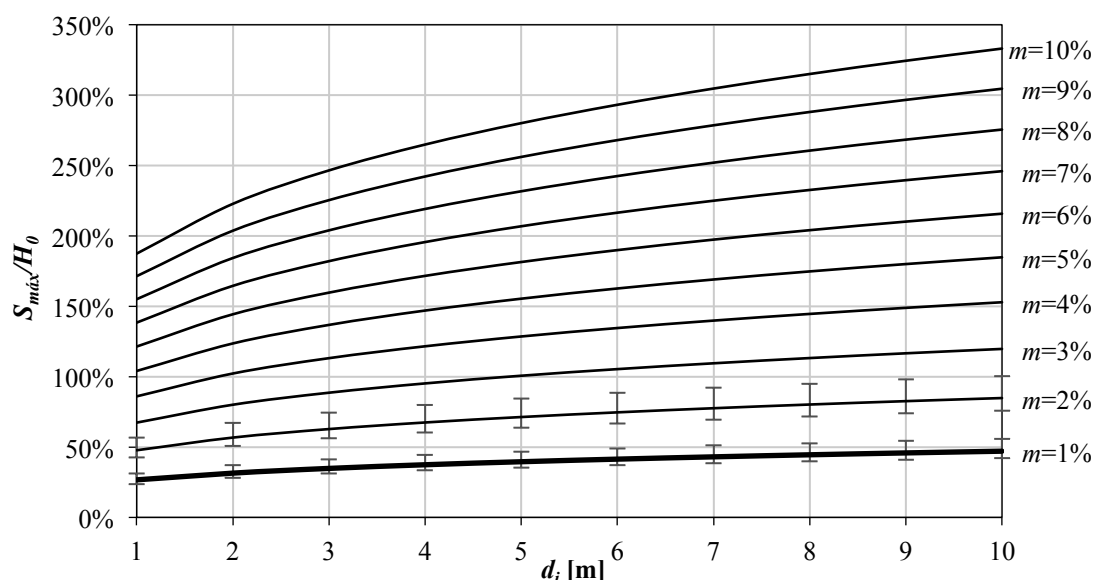


Figura 26 – Variação da profundidade máxima de erosão relativa em função da profundidade de fundo inicial, para diferentes inclinações médias do perfil de praia e diâmetro mediano dos sedimentos igual a 0,5mm (aplicação da formulação de McDougal *et al.*, 1996).

Verifica-se que para inclinações médias iguais a 1% e 2% a profundidade máxima de erosão relativa é inferior a 100%, para qualquer dimensão dos sedimentos. Comparando estes resultados com os das restantes formulações, verifica-se que a curva correspondente a $m=1\%$ e $d_{50}=0,3\text{mm}$ se aproxima bastante da curva média dos resultados de todas as formulações. Desta forma, nas análises seguintes foram adotados esses valores para os parâmetros respetivos. Como base na Figura 27, é possível aferir que a variabilidade da profundidade máxima de erosão em função da profundidade de fundo inicial é reduzida (variação média de 7%).

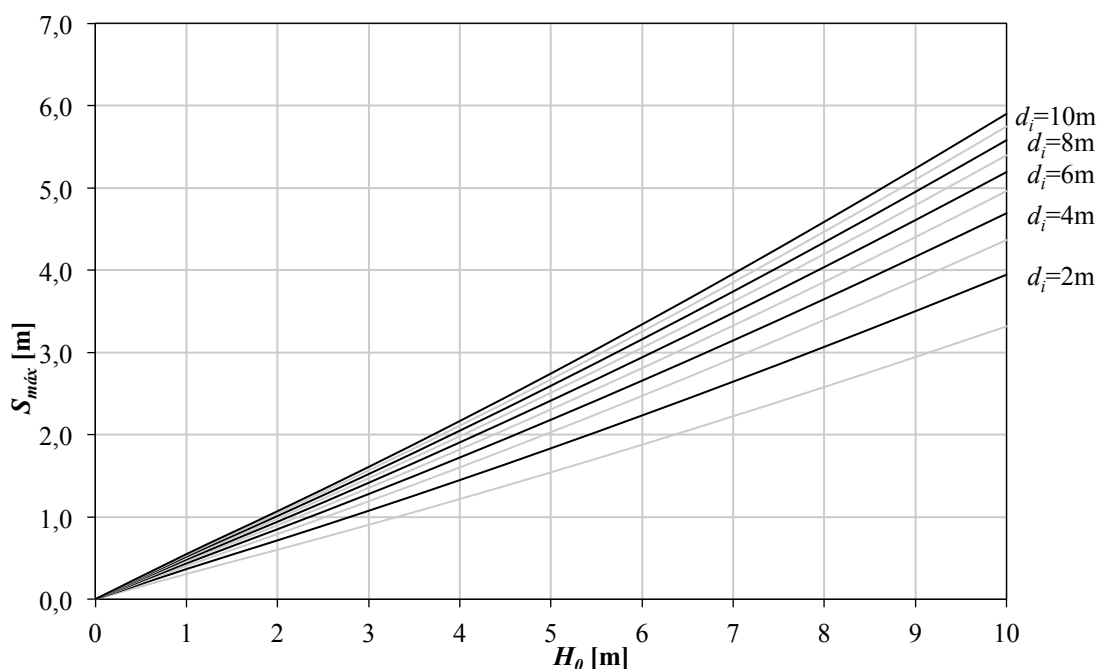


Figura 27 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de McDougal *et al.* (1996) especificamente para $m=1\%$ e $d_{50}=0,3\text{mm}$.

4.3.5. Powell e Whitehouse (1998)

Recorrendo ao índice de rebentação de McCowan (1891), a máxima altura de onda não rebentada ($H_{bm\acute{a}x}$) é função da profundidade de fundo inicial (d_i) e da altura de onda ao largo (H_0). O comprimento de onda médio antecedente à rebentação foi calculado segundo as equações 9 e 11, assumindo que é igual ao comprimento de onda ao largo. Desta forma, estão definidas todas as variáveis necessárias à aplicação desta metodologia. Determinadas as profundidades máximas de erosão relativas em função de alturas de onda ao largo e profundidades de fundo iniciais até 10m, obtém-se o gráfico de resultados da Figura 28.

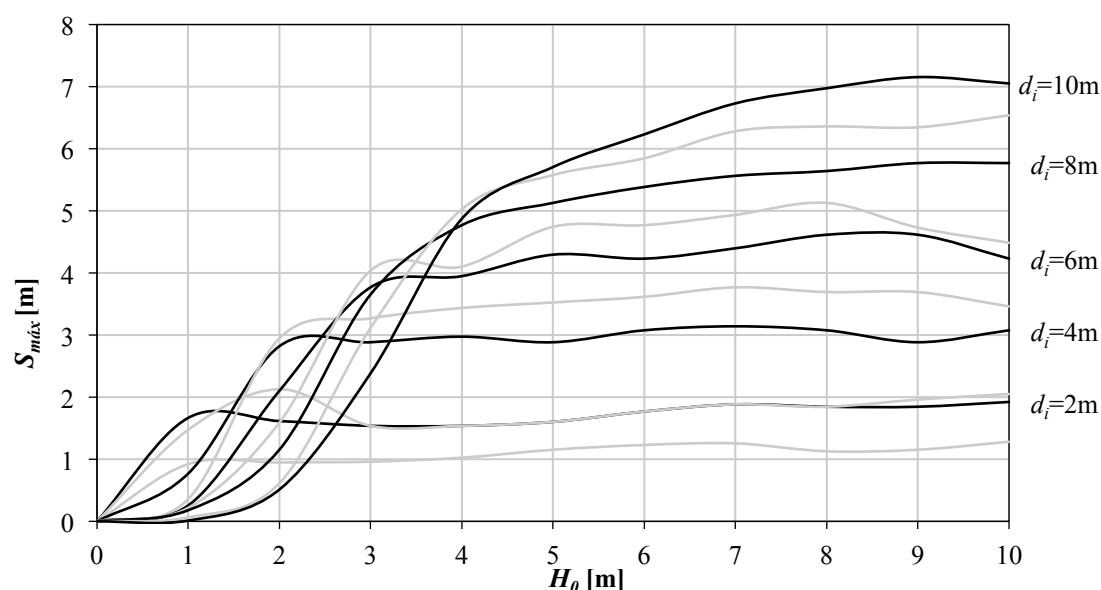


Figura 28 – Variação da profundidade máxima de erosão em função da altura de onda ao largo, para diferentes profundidades de fundo iniciais, aplicando a formulação de Powell e Whitehouse (1998).

Verifica-se que a profundidade erodida aumenta com a profundidade de fundo inicial, isto porque profundidades de fundo maiores permitem que ondas de maior altura atinjam a estrutura, aumentando a capacidade de transporte dos sedimentos. No entanto, é notório que, para cada profundidade de fundo inicial, existe um valor de altura de onda depois do qual a profundidade erodida estabiliza. Isto poderá dever-se à influência do fundo na rebentação das ondas, havendo dissipação de energia após a rebentação.

4.4. Análise estatística

Com o objetivo de sumarizar as 5 metodologias analisadas ao longo do subcapítulo 4.3 e permitir uma estimativa direta da profundidade máxima de erosão em praias com morfologia idêntica ao litoral Noroeste português, procedeu-se a uma análise global dos resultados obtidos. Em cada abordagem de cálculo, representou-se a profundidade máxima de erosão ($S_{máx}$) de duas formas distintas: em termos absolutos, em função da altura de onda ao largo (H_0) e da profundidade de fundo inicial (d_i); e em termos relativos ($S_{máx}/H_0$), em função apenas da profundidade de fundo inicial.

Procedeu-se ao cálculo das médias aritméticas de todos os resultados obtidos, tendo-se verificado que o comportamento das diversas metodologias é bastante distinto. Para cada profundidade de fundo inicial, é possível representar a profundidade máxima erodível obtida a partir de cada formulação, em função da altura de onda ao largo. Na Figura 29

representa-se esse comportamento, especificamente para uma profundidade de fundo inicial igual a 2m.

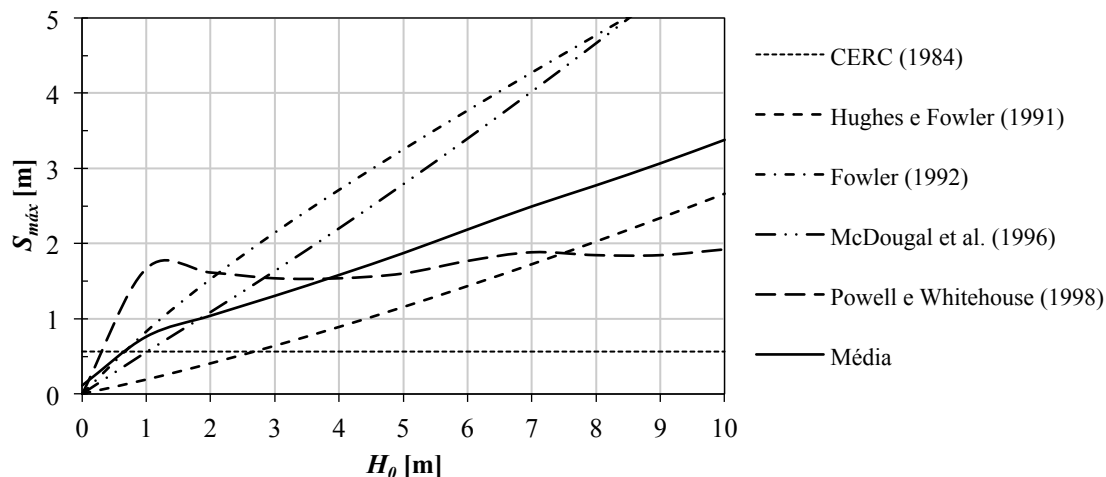


Figura 29 – Exemplo do comportamento das diversas formulações analisadas em termos de profundidade máxima de erosão e representação da curva média, especificamente para uma profundidade de fundo inicial igual a 2m.

Para as diferentes profundidades de fundo iniciais, considerando a média dos resultados das diversas formulações analisadas no subcapítulo 4.3, obtém-se as curvas representadas na Figura 30.

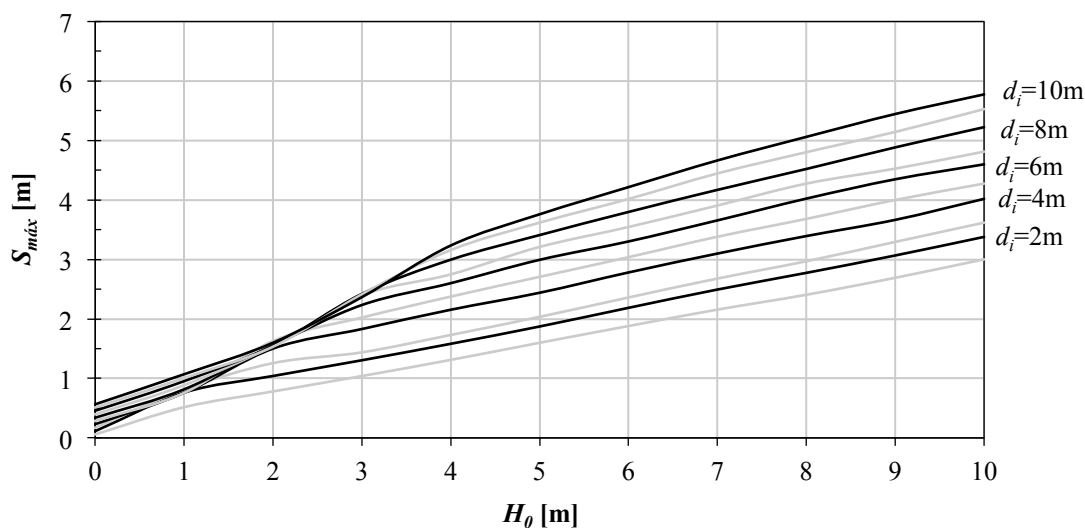


Figura 30 – Profundidade máxima erodível do perfil de praia em função da altura de onda ao largo, para várias profundidades de fundo iniciais, considerando a média de diferentes formulações.

Verificou-se que as diferentes curvas apresentam dois ramos distintos de comportamento: coincidem num primeiro ramo com declive constante; e a partir de um determinado ponto de inflexão, que depende da profundidade de fundo inicial, assumem um outro declive. Com vista a agilizar o processo de cálculo e a diminuir o erro associado à estimativa da

profundidade erodível através do ábaco da Figura 30, procurou-se encontrar uma função genérica aproximada às diversas curvas, tendo-se chegado à equação 32.

$$S_{m\acute{a}x} = \min(0,78H_0; c_1H_0 + 0,3d_i - c_2) \quad (32)$$

Onde c_1 e c_2 são constantes que dependem da profundidade de fundo inicial:

$$\begin{cases} c_1 = 0,30; c_2 = 0,2 & 0 < d_i \leq 4\text{m} \\ c_1 = 0,33; c_2 = 0,5 & 4 \leq d_i \leq 6\text{m} \\ c_1 = 0,35; c_2 = 0,7 & 6 \leq d_i \leq 8\text{m} \\ c_1 = 0,40; c_2 = 1,2 & 8 \leq d_i \leq 10\text{m} \end{cases}$$

A expressão desenvolvida aproxima-se das curvas iniciais com um erro médio associado de cerca de 3%, relativo, essencialmente, à diferença de valores em alturas de onda ao largo até os 2m. Quando não existe agitação marítima ($H_0 = 0\text{m}$), a profundidade erodível deverá ser nula, o que não se verifica nas curvas médias de resultados devido ao comportamento da metodologia de CERC (1984). A Figura 31 compara as curvas de resultados médios das diferentes formulações (representadas a traço interrompido) com os resultados obtidos pela equação 32 (representadas a traço contínuo).

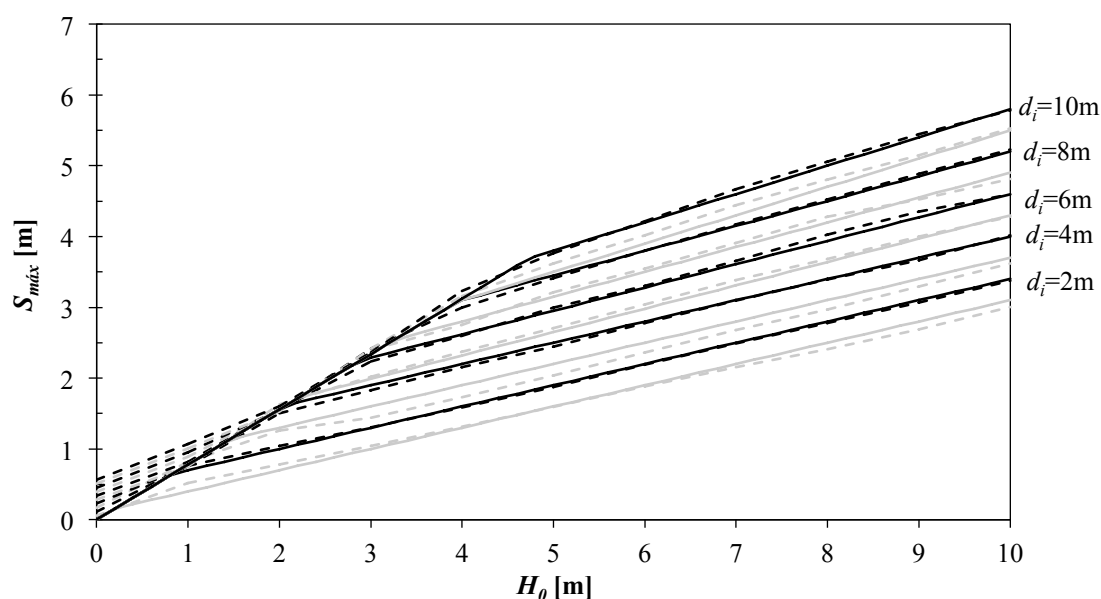


Figura 31 – Comparação entre os resultados da equação 32 (traço contínuo) e os valores das profundidades máximas de erosão estimadas pela média de diferentes formulações (traço interrompido).

Em termos relativos, a profundidade máxima de erosão relativa ($S_{m\acute{a}x}/H_0$) de cada metodologia analisada é representada por uma curva única correspondente à média de resultados para as diferentes alturas de onda ao largo (Figura 32).

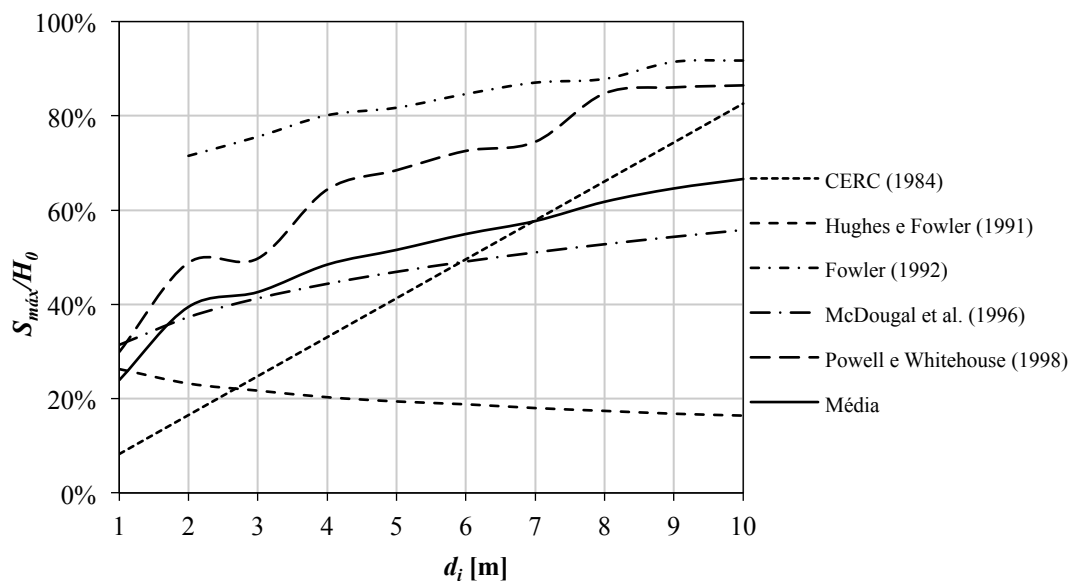


Figura 32 – Comportamento das diversas formulações/metodologias analisadas em termos de profundidade máxima de erosão relativa e representação de curvas médias.

A curva da Figura 33 permite, de forma simplista, ter uma estimativa da grandeza da profundidade máxima de erosão a longo prazo da incerteza que lhe está associada. As barras de erro correspondem ao desvio padrão do conjunto de valores médios. Poder-se-á dizer que, ao admitir que os resultados assumem uma distribuição normal, o intervalo compreendido pelas barras de erro corresponde a cerca de 70% dos valores estimados.

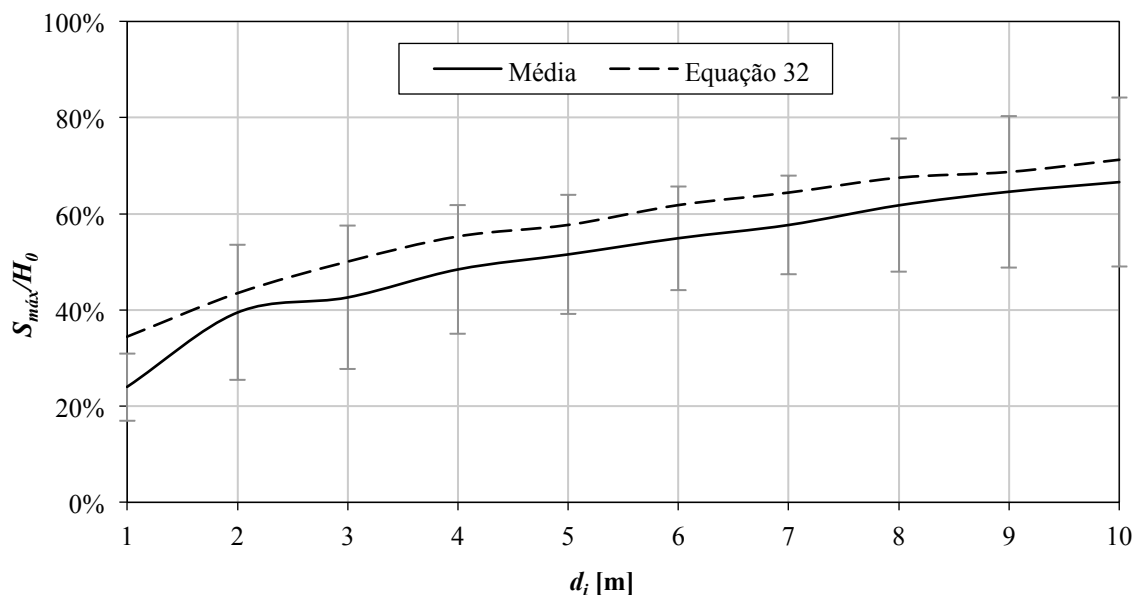


Figura 33 – Média da profundidade máxima de erosão relativa em função da profundidade de fundo inicial.

É importante referir que os resultados médios obtidos com a análise desenvolvida relativamente ao comportamento do perfil de praia, em frente a estruturas aderentes de

defesa costeira, são teóricos, totalmente baseados em formulações e metodologias já existentes na literatura e que nem sempre representam a situação do litoral Noroeste Português (paredes verticais, fundos horizontais, etc.). Como tal, é necessário ter em conta as incertezas associadas na interpretação dos resultados.

4.5. Distância à profundidade máxima erodida

Tem-se confirmado experimentalmente que o abaixamento do perfil de praia frontal não é uniforme, assumindo profundidades máximas que variam de posição em relação à estrutura aderente ao longo do tempo. No entanto, muitos dos estudos desenvolvidos para quantificar o abaixamento do perfil de praia têm implícita a localização dos pontos de maior erosão (Tabela 4), seja ela à face da estrutura de defesa costeira (zona da risberma), ou na posição do nodo das ondas a que é sujeito o modelo experimental (um quarto do comprimento de onda). Por outro lado, Song e Schiller (1973) estimaram a profundidade de erosão em função da distância à posição inicial da linha de costa, sendo variável o ponto de máxima erodibilidade.

Tabela 4 – Localização do ponto do perfil de praia com maior profundidade erodível, segundo as metodologias analisadas no subcapítulo 4.2.

Formulação	Ponto de maior profundidade erodível
Song e Schiller (1973)	Variável
Jones (1975)	Risberma
Xie (1981, 1985)	Nodo
Sumer e Fredsøe (2000)	Nodo
CERC (1984)	Risberma
Hughes e Fowler (1991)	Nodo
Fowler (1992)	Risberma
Powell e Lowe (1994)	Risberma
McDougal <i>et al.</i> (1996)	Risberma
Powell e Whitehouse (1998)	Risberma
O'Donoghue (2001)	Nodo

4.5.1. Herbich e Ko (1968)

Herbich e Ko (1968) realizaram ensaios laboratoriais em modelos à escala, precisamente com o objetivo de avaliar a variação da distância entre o ponto de maior profundidade erodida e a estrutura aderente. Os autores anteriormente referidos desenvolveram uma expressão que permite calcular essa distância média a longo prazo, dependendo do coeficiente de reflexão da estrutura, da profundidade do fundo à face da estrutura e das

características do fluido e dos sedimentos. Verificaram ainda que nos instantes iniciais a erosão ocorre com maior rapidez a uma certa distância da estrutura, mas que o abaixamento do perfil tende a assumir assintoticamente uma forma estável a longo prazo, o qual denominam estado último de erosão.

Aplicabilidade:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura de defesa costeira;
- Ondulação não rebentada;
- Fundos arenosos com inclinação nula;
- Muros verticais ou inclinados.

Formulação:

$$D_{méd} = \left(d - \frac{H_t}{2}\right) (1 - k_{rf}) u_* \left(0,75 C_D \rho_w \frac{\cot \theta}{d_{50}(\gamma_s - \gamma_w)}\right)^{1/2} \quad (33)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w C_D}} \quad (34)$$

Procedimento experimental:

A expressão foi obtida a partir de resultados experimentais num tanque de $0,6 \times 0,6 \times 20,5 \text{ m}^3$, com um fundo arenoso plano de d_{50} igual a $0,25 \text{ mm}$ e com um muro na extremidade do tanque com uma inclinação de 15° e 45° .

Observações:

A formulação prevê uma distância média ao ponto de maior erodibilidade, o que exclui a hipótese da máxima profundidade de erosão se dar na face da estrutura. Isto deve-se ao facto de Herbich e Ko (1968) terem verificado experimentalmente a existência de erosão em zonas afastadas da estrutura de defesa costeira nos instantes iniciais.

4.5.2. Conclusão

Tendo em conta que a maioria das formulações avaliadas no âmbito deste trabalho se referem à zona da risberma como a mais erodível (Tabela 4) e por razões de facilidade de aplicação das metodologias de estimativa de galgamentos e agilização do processo de cálculo, no decorrer do trabalho considerou-se que a profundidade máxima de erosão obtida pelas curvas da Figura 30 e pela equação 32 está localizada à face das obras longitudinais aderentes.

5

CASO DE ESTUDO

5. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo irá proceder-se à caracterização do caso de estudo (litoral do concelho de Ovar) em termos de clima de agitação marítima e historial de eventos de dano e de intervenções de defesa costeira. É no litoral desta região costeira, especificamente para o caso da praia do Furadouro, que serão aplicados os processos descritos e abordados nos dois capítulos prévios, de forma a estimar o efeito dos galgamentos, do afundamento do perfil de praia e quais os custos associados.

5.1. Enquadramento geográfico

O concelho de Ovar, pertencente ao distrito de Aveiro, está localizado no litoral Noroeste de Portugal (Figura 34) e apresenta uma área territorial total de cerca de 148km² (DGT, 2013) com mais de 55 mil habitantes (INE, 2012), correspondendo a uma densidade populacional de 375hab/km². O seu sistema costeiro caracteriza-se por ser maioritariamente arenoso e é banhado pelo Oceano Atlântico numa extensão de cerca de 15km.

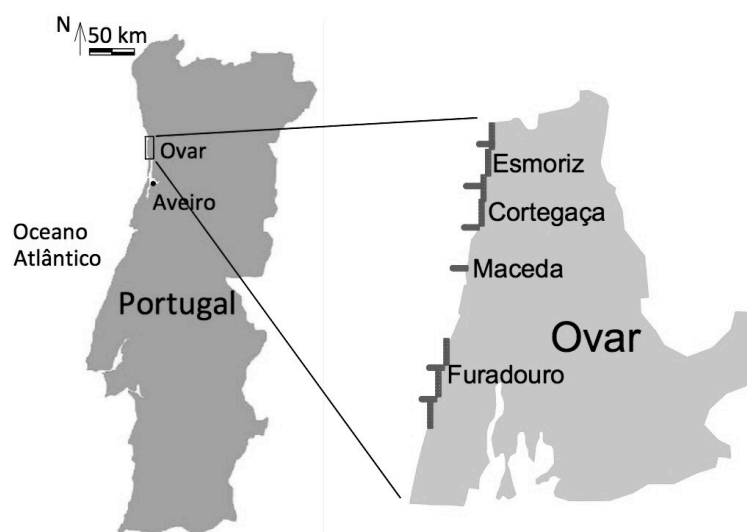


Figura 34 – Localização da área de estudo (Cruz *et al.*, 2015).

5.2. Agitação marítima

A análise do clima de agitação marítima no trecho em causa é essencial para o estudo e caracterização da dinâmica sedimentar e para a previsão da evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo. Por outro lado, a análise estatística dos registos de agitação marítima, juntamente com o conjunto de eventos de dano identificados, permite

estabelecer a relação entre os estados de agitação e a frequência e gravidade das ocorrências consequentes, facilitando a estimativa de tendências para o futuro. Importa realmente perceber se existe uma tendência de agravamento dos parâmetros de onda que justifique o eventual aumento de frequência de registos de dano no litoral de Ovar, ou se este facto resulta de uma crescente vulnerabilidade do litoral.

O Instituto Hidrográfico (IH) dispõe atualmente de três boias ondógrafo na costa continental portuguesa (Leixões, Sines e Faro). A boia que se considera ser mais representativa do litoral do concelho de Ovar é a de Leixões, devido à sua maior proximidade (localiza-se a cerca de 50km a norte). Salvo situações de inoperacionalidade da boia devido a possíveis reparações, a danos de origem natural ou humana, ou a dificuldades de comunicação telemétrica, a aquisição de dados é feita com intervalos de tempo de 3h em condições normais. Em situação de temporal, o intervalo entre registos é inferior a um minuto (IH, 2014). Portanto, verifica-se que em situações comuns existem 8 registos diários e cerca de 240 registos mensais. Os meses que apresentarem um número de registos superior a esse revelam a ocorrência de temporais. No âmbito deste trabalho foram analisados ao todo 71507 registos de agitação marítima desde o ano 1981 até ao ano 2014. As falhas na sequência de dados são frequentes, verificando-se as maiores lacunas entre fevereiro de 1985 e junho de 1993 e entre agosto de 2005 e dezembro de 2008.

A caracterização do regime de ondulação passa pela análise das distribuições de diferentes parâmetros de onda, nomeadamente a altura de onda significativa, H_s , o período médio, T_{Hs} , e a direção média correspondente ao período de pico, T_{htp} (Coelho e Veloso-Gomes, 2003). Coelho (2005) tratou dados da direção média associada ao período de pico desde o ano 1993 até 2003. Na Figura 35 apresenta-se a frequência relativa do rumo de ondulação dividido em classes de $22,5^\circ$. Verifica-se que a direção de ondulação predominante é noroeste. De facto, o quadrante de noroeste representa 88,4% dos registos enquanto que o quadrante de sudoeste representa apenas 3,9%. Em termos de situações de temporal persistente, o quadrante de sudeste praticamente não apresenta registos em Leixões (Figura 36).

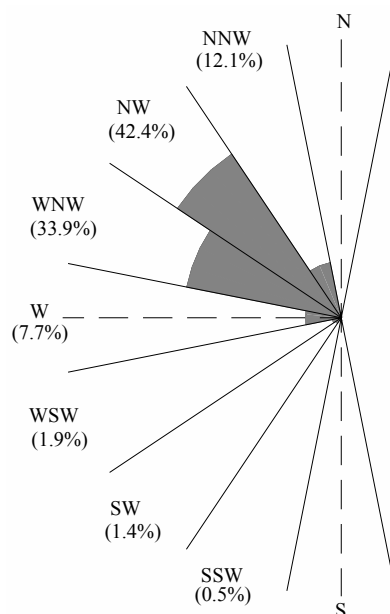


Figura 35 – Rosa de rumos com as classes de direção de propagação da ondulação dos registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003 (Coelho, 2005).

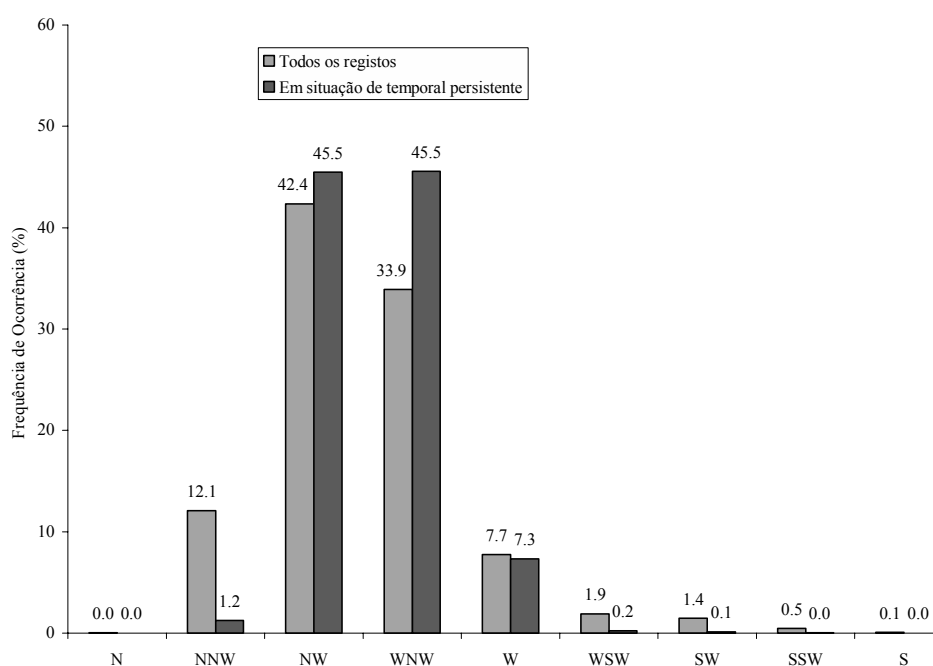


Figura 36 – Comparação da direção média anual de ondulação com as situações de temporal persistente (análise dos registos da boia ondógrafo de Leixões, entre 1981 e 2003, por Coelho, 2005).

De forma a analisar a evolução no tempo das características do regime de ondulação, recolheram-se todos os valores de altura de onda significativa disponíveis e direções de propagação para o período entre 1981 e 2014, obtendo-se as nuvens de pontos das Figuras 37 e 38, onde se sobrepuseram também as curvas dos valores médios anuais correspondentes a esses parâmetros.

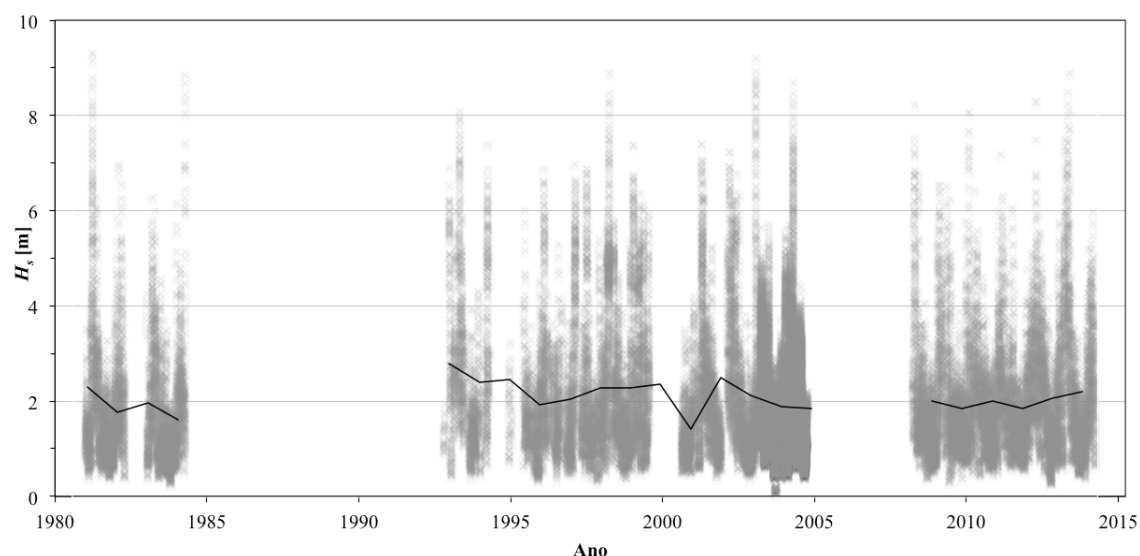


Figura 37 – Alturas de onda significativas ao largo na boia ondógrafo de Leixões, desde 1981 até 2014.

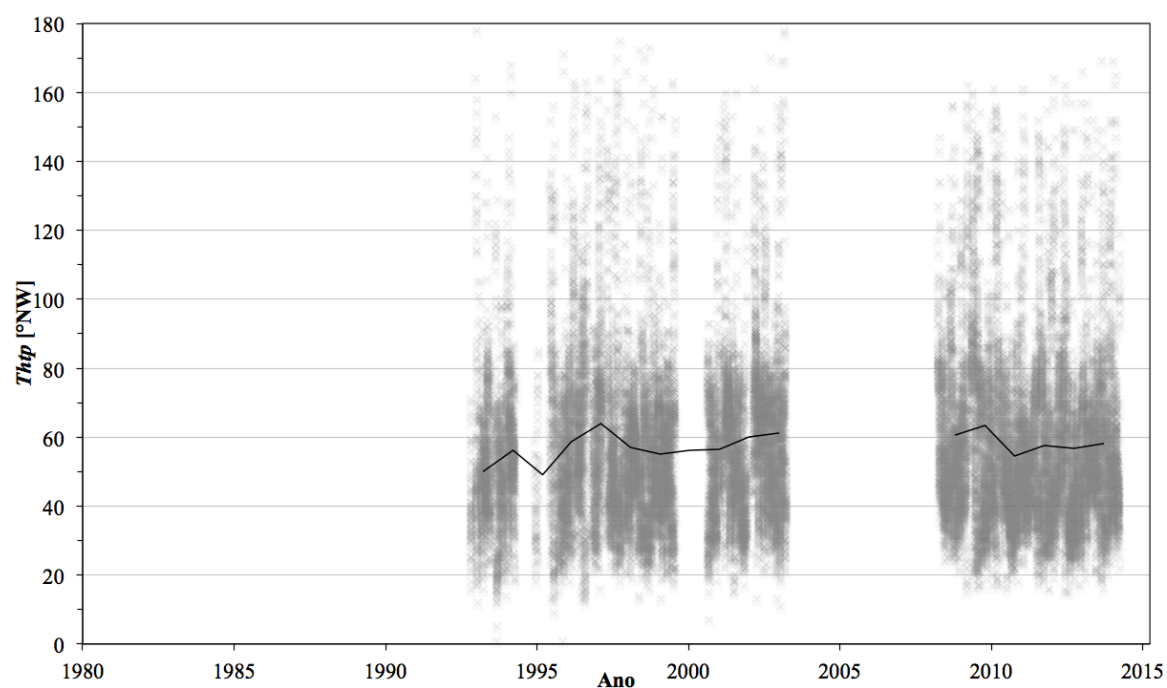


Figura 38 – Direção de propagação da ondulação na boia ondógrafo de Leixões, desde 1993 até 2014.

Verifica-se que, embora haja alguma dispersão de resultados (como seria espectável), existe predominância de rumos inferiores a 90°NW , ou seja, no quadrante de noroeste, e de ondas com altura significativa ao largo inferior a 3m. Em termos médios, nem as direções da ondulação, nem as alturas de onda ao largo apresentam variações significativas ao longo do tempo que justifiquem a crescente frequência de ocorrência de danos no litoral Noroeste português e, especificamente, nas praias do concelho de Ovar. Por outro lado, esta análise não permite tirar conclusões acerca da variação da frequência de tempestades ao longo do tempo.

5.3. Obras de defesa costeira existentes

Atualmente, nas praias de Esmoriz, Cortegaça, Maceda e Furadouro existem ao todo 7 obras longitudinais aderentes e 6 esporões construídos maioritariamente entre os anos 70 e 80 do século XX (Costa e Coelho, 2013). A Figura 39 apresenta valores aproximados das extensões dessas obras de defesa costeira e as Figuras 40 a 42 representam o corte transversal de três diferentes tipologias de obras aderentes, presentes em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, respetivamente. Em Esmoriz, a cota de coroamento é superior à cota da via pública no tardoz; em Cortegaça, a obra aderente tem dois patamares intermédios e uma superestrutura em betão armado; e no Furadouro, não existem patamares intermédios e o coroamento está ao nível da via pública.

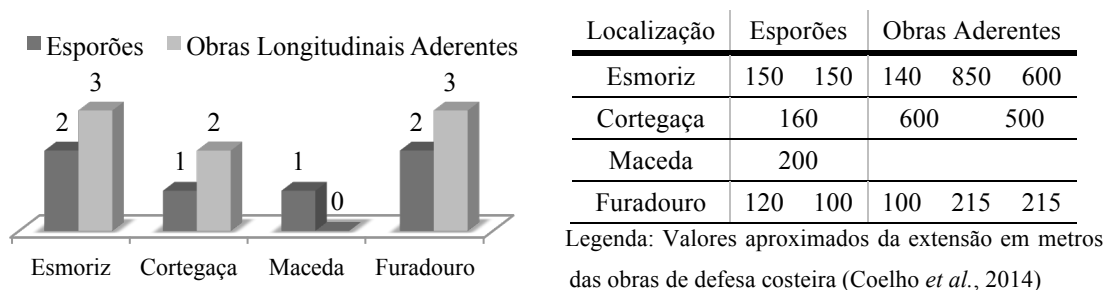


Figura 39 – Número e extensão das obras de defesa costeira na zona litoral do concelho de Ovar.

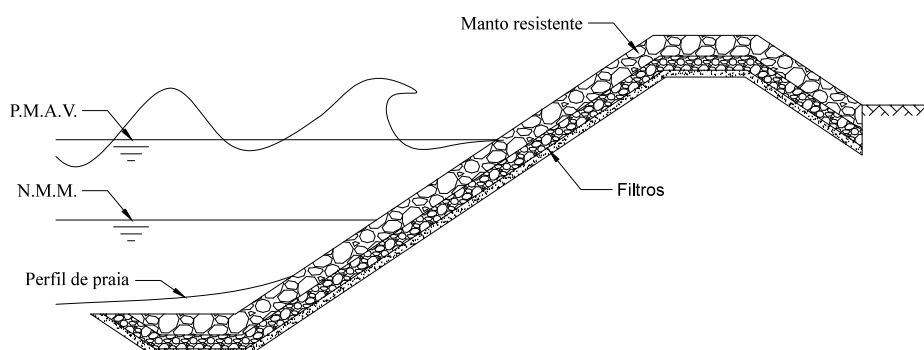


Figura 40 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente central de Esmoriz, cuja cota de coroamento é superior à cota da via pública no tardoz.

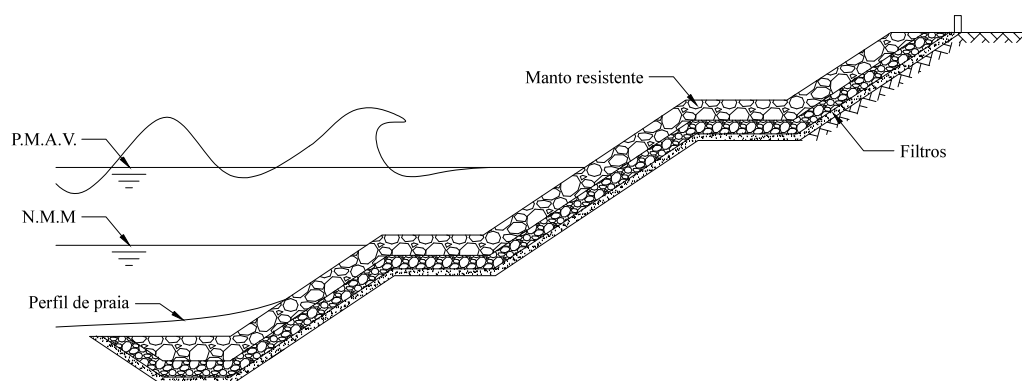


Figura 41 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Cortegaça, com duas banquetas.

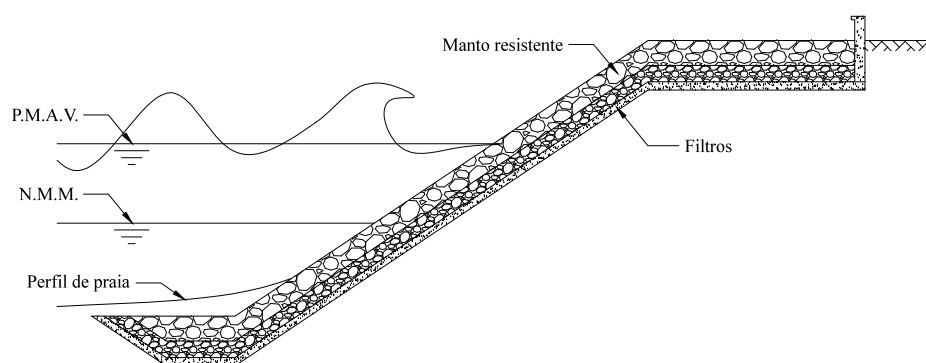


Figura 42 – Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente do Furadouro, sem patamares intermédios e com cota de coroamento igual à cota da via pública.

5.4. Causas da erosão costeira

Como se verificou na Figura 38, a costa Noroeste portuguesa está sujeita a rumos de ondulação com predominância no quadrante de noroeste (cerca de 90% dos registos). Assim, o transporte sedimentar longitudinal dá-se maioritariamente no sentido norte-sul, devido à componente longitudinal do rumo de ondulação. Acontece que, tem-se vindo a verificar uma tendência de enfraquecimento das fontes sedimentares (Veloso-Gomes, 2010), existindo uma redução de sedimentos provenientes dos rios (CEHIDRO, 2010). No litoral do concelho de Ovar, a grande responsabilidade do défice sedimentar resulta da redução de caudal sólido no rio Douro, estimado atualmente em cerca de $2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$ (GTL, 2014). De acordo com Coelho *et al.* (2009), isto deve-se essencialmente: ao número crescente de barragens (reduzem a velocidade de escoamento e criam albufeiras com capacidade de amortecimento de caudais de ponta de cheia); à captação de água para abastecimento de populações (reduz o caudal do rio); à extração de areias dos leitos para construção civil e navegabilidade de canais (reduz o volume de sedimentos disponíveis); e à artificialização de canais e revestimento de margens e leitos (evita a erosão e transporte sedimentar nessas zonas). As obras de defesa costeira construídas em aglomerados urbanos situados a norte de Ovar também conduzem a modificações na dinâmica sedimentar propagando os problemas de défice sedimentar para Sul, devido não só à retenção de sedimentos por parte dos esporões, mas também à redução da erodibilidade das praias associado à artificialização da linha de costa com recurso às obras longitudinais aderentes (Coelho *et al.*, 2014).

5.5. Eventos de dano devido à ação marítima

O atual grau de exposição das frentes costeiras urbanizadas à agitação marítima faz com que, quando ocorrem tempestades durante períodos de inverno, seja frequente o relato de ocorrências como galgamentos, inundações da via pública e de estabelecimentos, danos em infraestruturas junto à costa, etc. Neste subcapítulo pretende-se fazer o levantamento, o registo cronológico e a contabilização de eventos de dano consequentes da ação marítima no concelho de Ovar, bem como projetar a sua evolução no futuro.

5.5.1. Base de dados

O registo de acontecimentos associados à ação marítima é normalmente realizado pela Autoridade Nacional de Proteção Civil e pelas entidades responsáveis pelas intervenções de defesa costeira, tais como Câmaras Municipais, Comissão de Coordenação do Desenvolvimento Regional do Centro, Agência Portuguesa do Ambiente (ex-Administração Regional Hidrográfica do Centro e ex-Instituto Nacional da Água), entre outras. A literatura, os meios de comunicação social e os registos fotográficos da população residente, podem contribuir como fonte de informação relativamente a acontecimentos decorrentes da ação do mar (Coelho *et al.*, 2014). A compilação de dados de registos deste tipo é morosa e de grande complexidade. Verificaram-se dificuldades relativas: à grande dispersão, diversidade e imprecisão da informação disponível; à dificuldade de definição de um critério base de seriação e classificação de eventos e ocorrências; e ao grande número de perspectivas de atuação e entidades influentes na zona costeira alvo de estudo.

De forma análoga à base de dados elaborada por Pereira e Coelho (2011), admite-se como evento qualquer condição de agitação marítima com consequências no litoral (de duração variável). É possível num só evento a existência de vários tipos de ocorrências em diversas localizações (por exemplo, o temporal de fevereiro de 2014 causou diversos danos nas praias de Cortegaça, Furadouro e Maceda, mas em termos de eventos, é contabilizado como um evento único). Distinguem-se cinco tipologias de ocorrência (Coelho *et al.*, 2014): recuo da linha de costa (RLC); galgamentos (GAL); destruição do cordão dunar (DCD); danos em infraestruturas (DI); e danos em obras de defesa costeira (DDC). As Figuras 43 e 44 contabilizam o número de ocorrências por tipologia e por distribuição temporal respetivamente, como análise da base de dados de Pereira e Coelho (2011) complementada ao longo deste trabalho e presente no Anexo A.

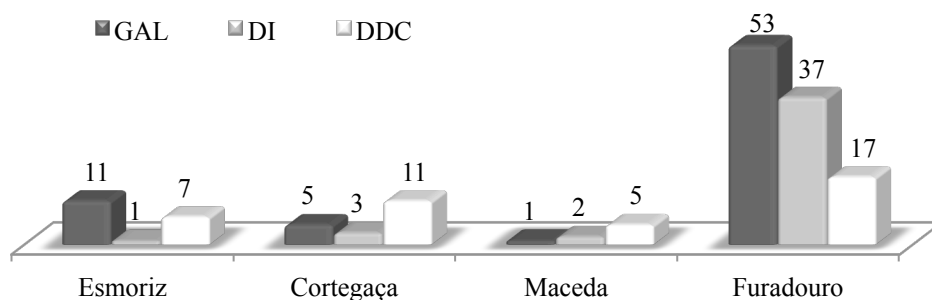


Figura 43 – Número de ocorrências registadas entre 1857 e 2015, distribuídas por tipologia: galgamentos, danos em infraestruturas e em obras de defesa costeira.

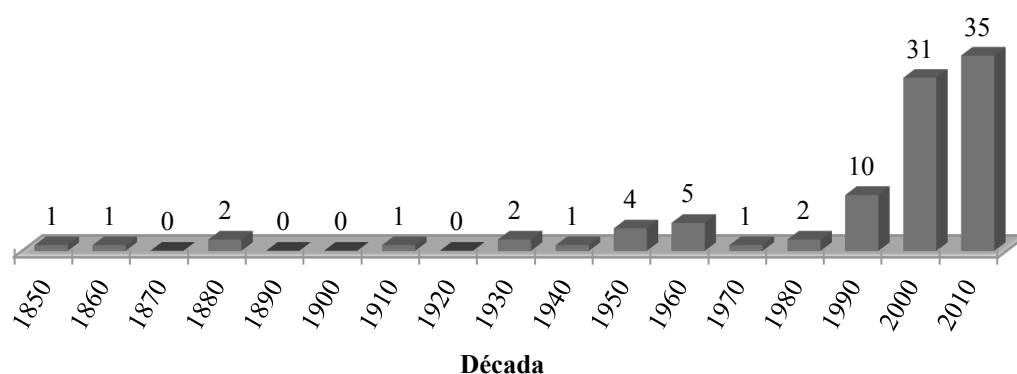


Figura 44 – Distribuição por décadas do número de eventos de danos registadas na zona litoral de Ovar, entre 1857 e 2015.

A interpretação dos dados recolhidos deve fazer-se com cuidado. Importa ter em conta que em períodos de tempo mais distantes, os registos de eventos são escassos, o que não significa necessariamente que o número de eventos ocorridos seja diferente do atual, isto porque quanto mais antigo for o evento, maior será a dificuldade em encontrar registos. Analogamente, quando o dano não afeta diretamente a população, podem não existir relatos. Dada a menor ocupação demográfica do passado, podem eventualmente não ter sido identificados alguns eventos. Inobstante, verifica-se que a praia do Furadouro regista o maior número de eventos de dano e observa-se uma tendência clara de aumento do número de ocorrências nas últimas décadas.

5.5.2. Estimativa da frequência de galgamento

A estimativa da frequência de galgamentos por aplicação dos ábacos da Figura 19, pressupõe o conhecimento das características geométricas das obras aderentes, nomeadamente a profundidade de fundo em frente à obra (d) e a relação entre a cota de coroamento da estrutura e o nível médio da superfície da água (ΔH). No entanto, a obtenção destes dados atualizados não é simples, verificando-se dificuldades em relação:

à falta de monitorização deste tipo de obras de defesa costeira; ao acesso aos documentos de projeto originais; e ao facto de serem várias as intervenções de reforço e reabilitação destas estruturas ao longo do tempo, modificando as suas características geométricas originais.

5.5.2.1. Frequência atual de galgamentos

O procedimento adotado para estimar as dimensões (d e ΔH) que caracterizam os galgamentos da obra aderente central do Furadouro consistiu em cruzar os registos de dano mensais, nomeadamente, o número de ocorrências e a respetiva data (mês e ano) de todos os galgamentos registados (Anexo A), com o número de dias com galgamentos resultantes do cálculo do espraio das ondas. O espraio foi obtido a partir dos registos do clima de agitação e conjugando todas as profundidades de fundo ($d \leq 10\text{m}$) e desníveis considerados ($2 \leq \Delta H \leq 10\text{m}$), de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.3. Desta forma, foram contabilizadas todas as correspondências exatas entre o número de dias com galgamentos efetivamente registados em cada mês e o número de dias com galgamentos obtidos a partir dos registos do clima de agitação. Para cada ano, mês e profundidade de fundo determinou-se uma única correspondência de desnível ΔH .

A contabilização do número de correspondências exatas foi feita assumindo as seguintes premissas: foi contabilizado apenas o menor desnível que tenha um número de dias com galgamentos registados igual ao número calculado nesse mês; foram contabilizadas as correspondências mesmo quando o número de dias registados com galgamentos foi nulo; não foi contabilizada qualquer correspondência num determinado mês e profundidade de fundo, se não houve nenhum número de dias com galgamentos calculado igual ao número efetivamente registado nesse mês. Assim, cada mês pode ter uma correspondência, pelo que existe no máximo um total de 12 correspondências anuais para cada profundidade de fundo. O somatório das correspondências de todos os anos em análise, presente na Tabela 5, permite prever quais as características geométricas (dimensões d e ΔH) das obras longitudinais aderentes que, em termos probabilísticos, melhor se ajustam à frequência de galgamentos efetivamente observados, quando sujeitas ao clima de agitação registado na boia ondógrafo de Leixões.

Tabela 5 – Somatório de correspondências entre o número calculado e registado de dias com galgamentos, a partir dos registos de agitação da boia de Leixões, em função de diferentes considerações de d e ΔH .

		d [m]								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔH [m]	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	12	1	1	1	1	1	1	1	0
	4	109	10	5	5	5	5	5	5	0
	5	46	63	13	8	8	8	8	8	0
	6	15	98	55	34	31	31	31	31	0
	7	12	13	85	40	31	26	26	26	0
	8	0	9	25	62	33	29	27	27	0
	9	0	9	7	32	47	18	21	22	0
	10	0	1	11	11	31	45	28	25	0

Verifica-se que o conjunto $d = 2\text{m}$ e $\Delta H = 4\text{m}$ é aquele que apresenta maior número de correspondências. No entanto, as diferenças de valores obtidos, para as diversas profundidades de fundo e desníveis, são pouco significativas. Isto deve-se ao facto de se considerarem apenas as correspondências exatas (igual número de dias com galgamentos) fazendo com que não haja equivalência em muitos dos casos. De forma a garantir um maior número de correspondências e, assim, aumentar a significância dos resultados, alterou-se uma das premissas anteriormente estabelecidas, passando-se a contabilizar o menor desnível que tivesse uma diferença do número de dias com galgamentos calculado e o número registado nesse mês entre 0 e 2 dias. Verificou-se desta forma que a conjugação $d = 2\text{m}$ e $\Delta H = 4\text{m}$ continuava a apresentar o maior número de correspondências, sendo representativa do comportamento que se observa na obra longitudinal aderente do Furadouro.

A partir destas dimensões (d e ΔH), estima-se uma frequência atual de cerca de 8,8% dos dias do ano com galgamentos na obra longitudinal aderente central do Furadouro, valor este que se aproxima do número de registos efetivamente observado nos últimos 2 anos.

5.5.2.2. Evolução da frequência de galgamentos

A estimativa da evolução da frequência de galgamentos ao longo do tempo depende do abaixamento máximo previsto do perfil de praia, obtido a partir do ábaco da Figura 30. Verifica-se que a profundidade máxima de erosão estimada segundo a metodologia descrita no subcapítulo 4.4 (que deve admitir uma única altura de onda, representativa do clima de agitação) é bastante variável consoante a altura de onda considerada. Ora, no caso específico da obra longitudinal aderente do Furadouro, surge a dificuldade em

conhecer qual a altura de onda ao largo (H_0) representativa do comportamento do caso de estudo. Perante essa incerteza, aplicou-se a equação 32 (estimativa da profundidade máxima de erosão) a todos os registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões, considerando uma profundidade de fundo inicial (d_i) igual a 2m. O valor médio das profundidades máximas de erosão calculadas é igual a 0,97m, com um desvio padrão de 0,38m. Partindo do princípio que o conjunto de resultados obtidos assume uma distribuição normal, poderá dizer-se que apenas 16% do total de registos de onda ao largo levariam a uma profundidade máxima de erosão superior à soma do valor médio com o desvio padrão (1,35m).

Assim, considera-se como representativo do comportamento na zona de estudo, uma altura de onda significativa ao largo de 3,16m, antecipando-se um abaixamento máximo do perfil de praia de cerca de 1,35m a longo prazo, perfazendo uma profundidade de fundo final (d_f) igual a 3,35m. Isto corresponde a um agravamento final anual de 35% do número de dias com galgamentos, caso não haja nenhuma intervenção.

5.5.3. Estimativa de custos

Os impactos dos galgamentos em termos de danos no edificado e perdas de bens materiais nas zonas urbanas inundadas são geralmente menosprezados e de difícil contabilização. A avaliação destes impactos seguiu o procedimento usado por Cruz *et al.* (2015) e por Roebeling *et al.* (2015), a partir das equações 35 e 36 (Oliveri e Santoro, 2000), em que a percentagem relativa de dano (D_i) é estimada a partir de curvas DDF (*depth-damage functions*, baseadas em Davis e Skaggs, 1992).

$$C_g = \sum v_i D_i A_i \quad (35)$$

$$D_i = \alpha_i h_i - \beta_i h_i^2 \quad (36)$$

A partir da descrição dos registos de dano foi possível mapear as zonas afetadas pelos galgamentos (Anexo C), permitindo aferir que um dia com galgamentos no Furadouro representa, em termos médios, uma área inundada de cerca de 0,68ha com uma altura de água de 5cm (afetando maioritariamente a zona da marginal junto ao esporão centro). Fontão (2008) estimou o valor de território da zona edificada, obtendo o valor de 1447,67€/m² na zona da marginal do Furadouro. O valor médio dos bens materiais estima-se em 250€/m² (Fidelidade, 2015) e de acordo com Roebeling *et al.* (2015), os parâmetros α_i e β_i tomam os valores de 38,7 e -8,7 para os edifícios e de 51,4 e -10,8 para

os bens materiais, respetivamente. Assim, estima-se que o valor médio atual dos danos por inundações (C_g) da zona urbana do Furadouro seja 210 000€/ano, relativo à frequência atual de galgamentos.

5.6. Intervenções de defesa costeira

A análise da tipologia e frequência das intervenções em cada troço permite identificar quais as zonas de maior vulnerabilidade e risco de erosão. Como referido, a elaboração e análise de uma base de dados com registos de intervenções no âmbito da defesa costeira é uma atividade complexa e morosa, verificando-se dificuldades relacionadas com: a escassez de informação relativa a datas mais antigas; a grande diversidade de entidades responsáveis por obras realizadas no trecho costeiro em estudo ao longo do tempo; a grande dispersão de dados existentes, nem sempre coincidentes entre as várias fontes; a conversão do valor monetário ao longo do tempo, de forma a ser plausível a comparação de custos entre intervenções de diferentes datas; e a definição de um critério homogéneo para consideração de uma ação sob a zona costeira como uma intervenção, dependendo da localização e tipologia da ação, do faseamento de empreitadas e da forma de orçamentação.

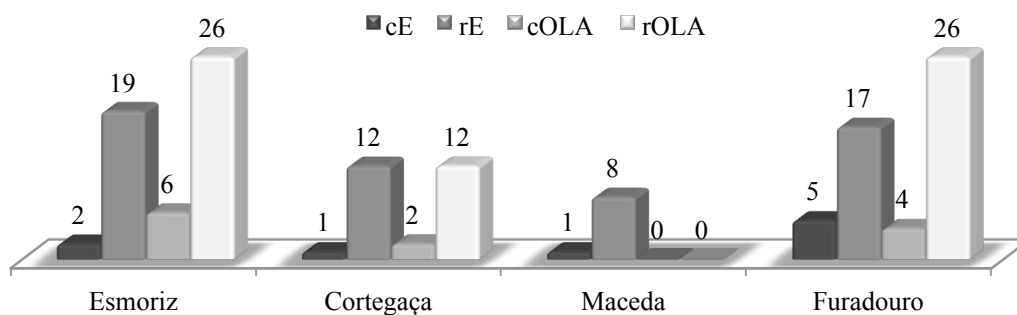
5.6.1. Base de dados

Em Pereira e Coelho (2011) foi feita uma recolha de registos de intervenções na zona litoral de Ovar entre 1958 e 2010, não tendo sido identificado o custo monetário e a duração de execução dos trabalhos relacionados com a intervenção. Em Coelho *et al.* (2014) foi também compilada informação relativa a intervenções na zona costeira de Ovar entre 1999 e 2010, incluindo os custos e entidades responsáveis. Complementarmente, a Câmara Municipal de Ovar disponibilizou alguma informação relativa a registos de intervenções nas praias de Esmoriz, Cortegaça, São Pedro de Maceda e Furadouro e foram também utilizados os dados disponíveis nos relatórios de atividades da ARHC, APA e do programa POVT-QREN. A base de dados de registos de intervenções considerada neste capítulo resulta da compilação de dados das várias fontes supracitadas, sendo descrita com maior detalhe no Anexo B.

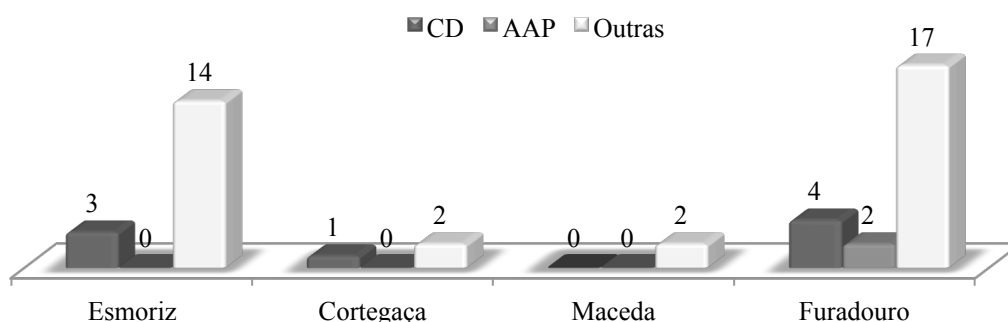
Em jeito de seriação de registos, admite-se que uma intervenção pode ter carácter de emergência (IE) e ser classificada de acordo com construção (c) e reabilitação (r) de esporões, E, e obras longitudinais aderentes, OLA, reforço do cordão dunar (CD),

alimentação artificial de praias (AAP) e outras intervenções de ordenamento e requalificação da marginal (Outras). Em termos de critérios adotados, considera-se como intervenção de defesa costeira toda a ação que visa proteger o território litoral da agitação marítima, ou que é consequente desta, independentemente do seu valor orçamentado, da sua categorização e da diversidade de localidades. Por exemplo, uma empreitada com orçamentação global com o objetivo de manutenção de um esporão na praia de Maceda e de duas obras aderentes no Furadouro e Esmoriz é considerada como apenas uma intervenção, mesmo sendo afeta a várias localidades e a dois tipos de estruturas de defesa costeira diferentes. No entanto, na categorização de intervenções por tipologia consideram-se 2 intervenções em obras longitudinais aderentes (OLA) e uma em esporão (E). Por outro lado, em empreitadas divididas em fases de orçamentação distinta, são admitidas como intervenções todas as fases orçamentadas, desde que tenham diferentes datas de início de execução. No caso em que a orçamentação seja feita separadamente, mas a data de início dos trabalhos é a mesma, é considerada apenas uma única intervenção, cujo custo é igual à soma dos orçamentos.

A Figura 45 enumera as intervenções de cada tipologia realizadas desde 1958 até 2014 nas praias de Esmoriz, Cortegaça, Maceda e Furadouro. A Figura 46 enumera o total de registos de intervenção segundo uma distribuição temporal anual.



a) Construções e intervenções de reabilitação de esporões e obras longitudinais aderentes



b) Alimentações artificiais do cordão dunar e da praia e outras intervenções de requalificação da marginal

Figura 45 – Número e tipologias de intervenção realizadas na zona costeira de Ovar, entre 1958 e 2014.

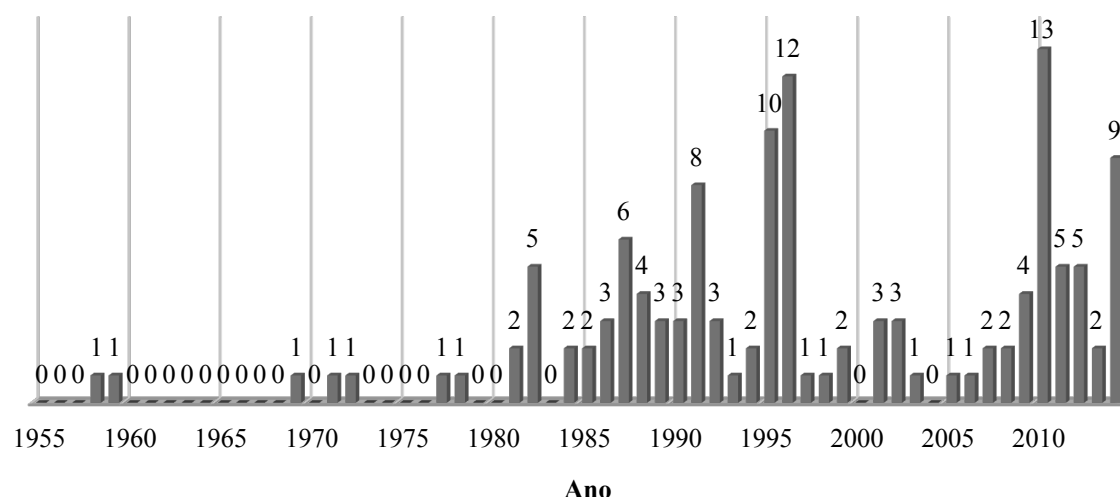


Figura 46 – Distribuição anual do número de intervenções de defesa costeira realizadas nas praias de Ovar, entre os anos 1958 e 2014.

Verifica-se que as praias do Furadouro e de Esmoriz apresentam maior vulnerabilidade, devido à quantidade de intervenções que registam. Observa-se que existe uma tendência de aumento do número de intervenções realizadas ao longo do tempo. Esta tendência reflete o aumento da vulnerabilidade e fragilidade da zona costeira em estudo, mas está também associada à maior facilidade de obtenção de informação datada recentemente e ao aumento do número de obras de defesa costeira no trecho, que obrigam a intervenções de manutenção com maior regularidade.

5.6.2. Custos de intervenção

De forma a analisar os custos associados às intervenções de defesa costeira de diferentes datas e poder compará-los, é necessário atualizar o valor monetário, tendo em conta vários fatores, sendo um deles o efeito da inflação. No entanto, os valores apresentados na base de dados foram apenas sujeitos à taxa de câmbio escudo-euro referente ao ano de entrada em vigor da nova moeda (1 euro = 200,482 escudos), sendo correspondentes ao ano em que foram orçamentados. A Figura 47 explicita os custos anuais de intervenção associados a obras de defesa costeira no concelho de Ovar, desde o ano de 1999, os quais são relativos a cada uma das praias do concelho, segundo a distribuição da Figura 48.

O facto dos anos 1999, 2008 e 2014 apresentarem custos de intervenção díspares em relação aos restantes anos não pressupõe que o clima de agitação marítima tenha sido mais energético nesses anos, ou que tenha havido um maior volume de danos. A discrepância entre os custos anuais obtidos, resulta em grande parte da complexidade dos processos administrativos e de eventuais restrições de financiamento. Por outro lado, as

intervenções registadas na base de dados estão organizadas segundo a data de adjudicação e não foi tida em conta, na análise temporal de custos, a duração de cada intervenção ou eventuais períodos e tranches de financiamento.

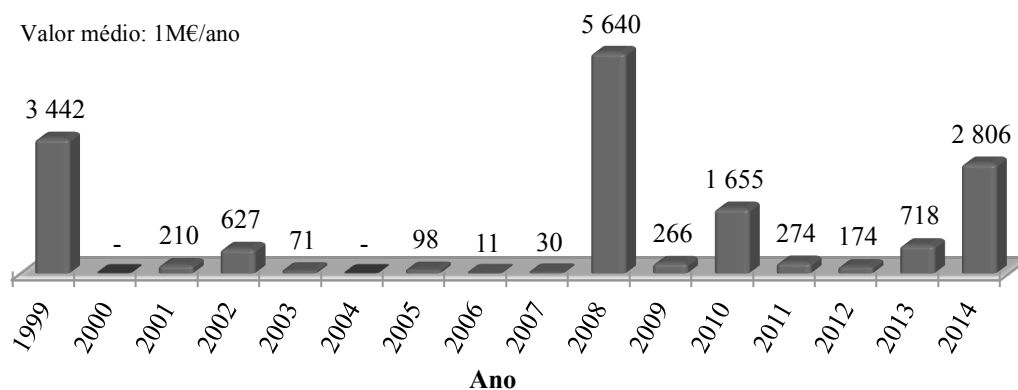


Figura 47 – Custo de intervenções de defesa costeira no concelho de Ovar [10^3 €].

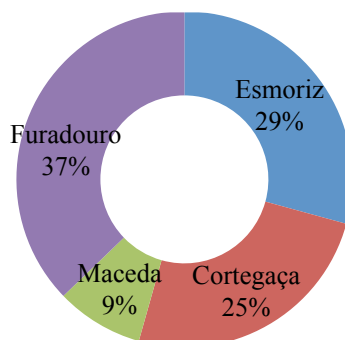


Figura 48 – Distribuição relativa de custos de intervenção desde 1999 nas praias de Ovar.

Com base nestes valores e numa análise criteriosa da descrição das intervenções, estabeleceram-se custos de referência para reabilitação de obras longitudinais aderentes e reparação de infraestruturas devido à ocorrência de galgamentos, representativos das praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Tabela 6).

Tabela 6 – Custos de reabilitação de obras longitudinais aderentes e reparação de infraestruturas em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, com base nos registos de 1999 a 2014.

		Valores registados:			Valores adotados:	
		Total	€/ano	€/m/ano	€/ano	€/m/ano
Custos de reabilitação	Esmoriz	3 309 804,40	206 862,77	130,10	207 000,00	130,00
	Cortegaça	3 503 957,39	218 997,34	365,00	219 000,00	370,00
	Furadouro	4 209 789,28	263 111,83	496,44	263 000,00	500,00
Custos de reparação de infraestruturas	Esmoriz	144 325,59	9 020,35		9 000,00	
	Cortegaça	21 460,00	1 341,25		—	
	Furadouro	477 324,07	29 832,75		30 000,00	

Verifica-se que os custos de reabilitação obtidos diferem entre as três praias. Isto poderá dever-se ao facto do grau de exposição das diversas obras longitudinais aderentes à ação direta das ondas ser diferente de zona para zona, dependendo, por exemplo, da geometria e profundidade do perfil de praia. Por outro lado, conforme descrito no subcapítulo 5.3, as características geométricas de cada obra aderente são distintas, condicionando a altura máxima de espraçamento das ondas e a energia que estas dissipam sobre a estrutura. Também o recurso a diferentes materiais para a realização da obra, ou a diferentes características de interligação entre blocos (por exemplo, a solidificação de blocos com o preenchimento de vazios com betão), fazem variar a suscetibilidade da estrutura à existência de roturas.

Por último, não foi possível ter acesso a valores detalhados de cada orçamento global compilado na base de dados de intervenções. Pelo facto de muitos orçamentos incluírem diversas áreas de intervenção ou englobarem várias estruturas de defesa costeira em locais variados, a divisão de custos especificamente para um local ou para uma estrutura de defesa costeira pode não ser representativa dos valores reais. Por exemplo, a intervenção de maio de 2014, descrita como reabilitação de troços das obras aderentes de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, foi orçamentada num valor total de 972 738,51€. Assumiu-se uma relação direta entre os custos de intervenção e o número de obras existentes nas diversas praias. Ou seja, tendo o Furadouro 3 obras aderentes de um total de 7 existentes nas 3 praias afetas, considerou-se que custo de intervenção contabilizado especificamente para as estruturas do Furadouro correspondia a 3/7 do orçamento global. É necessário ter em conta que estas limitações e assunções induzem incertezas na avaliação, com consequentes discrepâncias nos valores totais obtidos para os diferentes locais e estruturas de defesa costeira.

INTERVENÇÕES PARA REDUZIR
GALGAMENTOS

6. INTERVENÇÕES PARA REDUZIR GALGAMENTOS

Procedeu-se ao estudo de alternativas para a redução da percentagem anual de galgamentos, assumindo três diferentes abordagens de intervenção: o aumento da cota de coroamento da obra aderente (subcapítulo 6.1); a diminuição da profundidade de fundo em frente à obra, ou seja, alimentar artificialmente com sedimentos o perfil de praia (subcapítulo 6.2); ou a construção de um patamar intermédio (subcapítulo 6.3). Cada tipologia de intervenção tem associados diferentes custos e níveis de eficácia, dependendo das características geométricas da obra longitudinal aderente e da agitação marítima a que está sujeita.

A previsão de custos de cada tipo de intervenção foi feita tendo como base os custos unitários (C_u) presentes na Tabela 7, obtidos a partir da consulta de orçamentos de construção de obras aderentes e de intervenções de reperfilamento e alimentação artificial de praias presentes na literatura, aplicados à região em estudo (Carpinteiro, 2009 e Almeida, 2011).

Tabela 7 – Custos unitários dos materiais considerados no cálculo dos custos das intervenções.

Material:	Custo unitário (C_u): [€/m ³]
Enrocamento granítico	50,00
Areia	5,00

6.1. Aumento da cota de coroamento

O aumento da cota de coroamento faz com que o desnível ΔH entre a cota de coroamento e o nível médio da superfície livre do mar seja superior. Desta forma, reduz-se a quantidade de ondas cujo espraioamento poderia galgar a obra longitudinal aderente, minimizando a frequência de galgamentos. A altura de coroamento necessária para reduzir uma determinada frequência de galgamentos pode ser determinada através do ábaco da Figura 19, onde a profundidade de fundo (d) se mantém constante. A Figura 49 representa esquematicamente a tipologia do coroamento considerada neste trabalho.

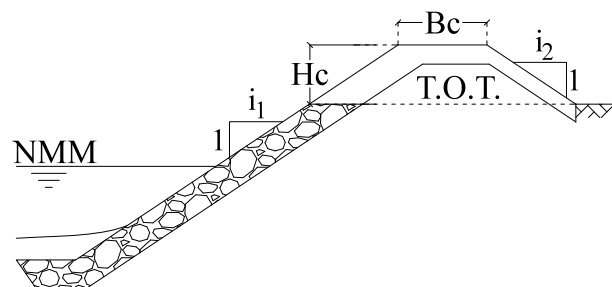


Figura 49 – Perfil transversal tipo do aumento da cota de coroamento de uma obra longitudinal aderente.

Esta solução não tem impacto na profundidade de fundo à frente da obra, ou seja, não afeta a morfologia e batimetria da praia. Desta forma, o processo de evolução do perfil de praia descrito no capítulo 4 mantém-se inalterado.

6.1.1. Estimativa de custo

De forma simplificada, considera-se que o custo unitário do enrocamento inclui, em termos médios, os restantes custos diretos e indiretos inerentes à execução da intervenção. Desta forma, o custo desta intervenção (C_c) por metro linear pode ser estimado a partir da equação 37, assumindo que não existe superestrutura, que o preço unitário do TOT é igual ao do manto resistente e que o coroamento segue a geometria presente na Figura 49.

$$C_c = C_u H_c \left[B_c + \left(\frac{i_1 + i_2}{2} \right) H_c \right] \quad (37)$$

6.1.2. Aplicação ao caso de estudo

No caso da obra longitudinal aderente central do Furadouro ($d_i = 2\text{m}$ e $\Delta H = 4\text{m}$), um aumento de 2m da cota de coroamento aumenta o desnível ΔH para os 6m. Esta intervenção resulta numa redução para 0,3% de ocorrência de galgamentos. Supondo um abaixamento do perfil de praia em 1,35m (subsecção 5.5.2.2) ao longo do tempo, a profundidade de fundo em frente da obra (d_f) seria igual a 3,35m, o que pressupõe uma percentagem final de 7,6% de dias com galgamentos a longo prazo, quando o perfil de praia atingir o equilíbrio.

Assumindo que o coroamento apresenta 3m de largura e tem inclinações do manto resistente à frente e no tardo da obra iguais a 3/2 (H/V), então estima-se que o aumento da cota em 2m tenha um custo associado de cerca de 600€ por metro linear de obra longitudinal aderente.

6.2. Alimentação artificial do perfil de praia

A alimentação artificial do perfil de praia é uma solução de prevenção da erosão costeira que consiste na colocação de sedimentos no local que se pretende proteger, extraídos e transportados a partir de um local de empréstimo. O principal objetivo é o aumento da cota do fundo da praia em frente à obra (Figura 50), conferindo sedimentos para alimentar os trechos a sotamar por efeito da deriva litoral ao longo do tempo.

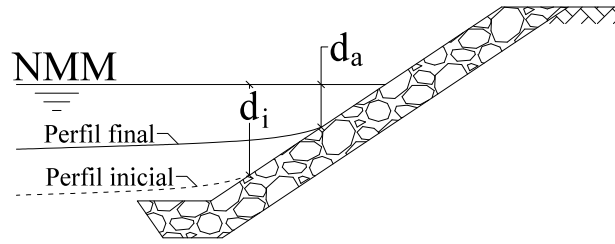


Figura 50 – Perfil transversal tipo de uma alimentação artificial de areias à frente de obras aderentes.

De forma análoga ao subcapítulo anterior, a partir da Figura 19 pode-se determinar diretamente a diminuição da profundidade de fundo necessária para reduzir uma determinada percentagem anual de galgamentos, ou seja, define-se qual a altura de areia que é necessário introduzir em frente à obra longitudinal aderente (o desnível ΔH é constante). A morfologia da praia é alterada, sendo induzido um estado de desequilíbrio dinâmico no perfil de praia, com tendência para o seu abaixamento até uma nova profundidade máxima erodível, o que obriga a uma necessidade recorrente de intervenção. Este período depende do estado inicial do perfil de praia e da relação entre a profundidade máxima erodível e a altura de areia introduzida na risberma da obra aderente. No âmbito deste trabalho, considerou-se apenas uma única intervenção inicial, não se efetuando recargas ao longo do tempo. A nova profundidade máxima de erosão ($S_{máx}$) pode ser estimada a partir da profundidade de fundo após a intervenção (d_a), recorrendo ao ábaco da Figura 30 ou à equação 32, presentes no subcapítulo 4.4.

A forma do perfil de praia depende de um vasto conjunto de fatores, entre os quais se destacam a granulometria dos sedimentos do fundo e as características da agitação marítima. Se todos os parâmetros forem constantes ao longo do tempo, o perfil de praia tende a assumir uma geometria de equilíbrio. Desenvolvida com base no estudo de casos de perfis de praia na Dinamarca e na Califórnia (Bruun, 1954) e mais tarde comprovada com a análise de Dean (1977) a diversas praias da costa do golfo do México e da costa este americana, a equação 38 é uma expressão genérica para a geometria do perfil de equilíbrio, que representa a profundidade de fundo do perfil de praia (h) em função da distância à linha de costa (x), de um parâmetro de inclinação do perfil de praia (m) e de um parâmetro de escala dos sedimentos (A).

$$h(x) = Ax^m + d \quad (38)$$

$$A = 2,25\sqrt[3]{\omega^2/g} \quad (39)$$

O parâmetro m pode tomar diferentes valores, consoante o tipo de dissipação de energia da praia em análise. Conforme o exposto em Cowell *et al.* (1999), autores como Bruun, Dean, Kotvojs e Cowell apontam para um valor de m igual a $2/3$ em praias dissipativas, a partir de diversos trabalhos de campo e análises teóricas, valor este que será o considerado no âmbito deste trabalho. No cálculo do parâmetro A , a velocidade de queda dos sedimentos (ω) é determinada a partir das formulações de Hallermeier (1981), Rijn (1984) e/ou Soulsby (1997), que dependem em grande parte de um parâmetro adimensional de dimensão dos grãos (D_*) que reflete a influência: da dimensão dos sedimentos (d_{50}); da relação entre pesos específicos dos sedimentos e da água do mar (s); e do coeficiente de viscosidade cinemática da água (ν), variável com a salinidade e temperatura da água.

6.2.1. Estimativa de custo

O custo desta intervenção está intrinsecamente relacionado com o modo e localização da extração dos sedimentos e o seu modo de transporte e colocação na praia. No entanto, no presente trabalho irão ser desprezados esses fatores, considerando-os incluídos, em termos médios, no custo unitário do material. Desta forma, a abordagem adotada para estimar o custo desta intervenção baseia-se no volume de areia V_a que é necessário colocar no perfil de praia. Integrando a diferença (equação 41) entre as cotas do perfil de praia inicial e do perfil de praia após a alimentação artificial, entre as distâncias horizontais inicial (x_c^i) e final (x_c^a) desde a risberma da obra aderente até à profundidade de fecho (h_c), dadas pelas equações 42 e 43, respetivamente, foi possível obter a equação 44, que permite estimar o volume de areia (V_a) que é necessário introduzir no perfil por metro linear de obra longitudinal aderente.

$$\int_0^{x_c} h(x) dx = \left(\frac{A}{m+1} \right) x^{m+1} + dx \quad (40)$$

$$V_a = \int_0^{x_c^a} h(x) dx - \int_0^{x_c^i} h(x) dx + (x_c^a - x_c^i) h_c \quad (41)$$

$$x_c^i = \left[\frac{(h_c - d_i)}{A} \right]^{1/m} \quad (42)$$

$$x_c^a = \left[\frac{(h_c - d_a)}{A} \right]^{1/m} \quad (43)$$

$$V_a = \left(\frac{A}{m+1} \right) \left[\left(\frac{h_c - d_i}{A} \right) x_c^i - \left(\frac{h_c - d_a}{A} \right) x_c^a \right] + (h_c - d_a) x_c^a + (d_i - h_c) x_c^i \quad (44)$$

De acordo com Kraus *et al.* (1998) e Morang e Parson (2002), o perfil ativo de uma praia é definido como sendo a largura de um perfil transversal onde ocorrem processos de transporte sedimentar devido à ação das ondas e, conseqüentemente, existem variações significativas das cotas de fundo. O limite de maior profundidade do perfil ativo, a partir do qual deixa de haver transporte sedimentar significativo, denomina-se profundidade de fecho (h_c). Na ausência de medições periódicas do caudal sólido ao longo do perfil de praia, esta profundidade pode ser estimada de forma empírica a partir, por exemplo, das expressões 45 e 46 de Hallermeier (1978) e Birkemeier (1985), respetivamente. O custo desta intervenção (C_a) pode então ser estimado através do produto entre o volume de areia necessário a introduzir e o custo unitário da areia (equação 47).

$$h_c = 2,28H_s - 68,5 \left(\frac{H_s^2}{gT_{Hs}^2} \right) \quad (45)$$

$$h_c = 1,75H_s - 57,9 \left(\frac{H_s^2}{gT_{Hs}^2} \right) \quad (46)$$

$$C_a = V_a C_u \quad (47)$$

6.2.2. Aplicação ao caso de estudo

No caso da obra longitudinal aderente central do Furadouro ($d_i = 2\text{m}$ e $\Delta H = 4\text{m}$), a partir do ábaco da Figura 19b prevê-se que o aumento de 1m da altura do perfil de praia junto do pé da obra aderente ($d_a = 1\text{m}$) reduza a percentagem de galgamentos para 0% após a intervenção. Segundo a equação 32 (subcapítulo 4.4) e a partir de uma altura de onda significativa ao largo igual a 3,16m (subsecção 5.5.2.2), antecipa-se um abaixamento do perfil de praia de 1,05m, perfazendo 13,3% de dias com galgamentos quando for atingido o perfil de equilíbrio. No entanto, no caso do perfil de praia estar estabilizado antes da alimentação artificial, o abaixamento ocorre até ao perfil de equilíbrio pré-intervenção.

Foi considerada uma profundidade de fecho igual a 12m, com base na formulação de Birkemeier (1985) aplicada por Coelho (2005) aos registos de agitação da boia ondógrafo de Leixões entre 1981 e 2003. A velocidade de queda foi determinada segundo a média aritmética das formulações de Hallermeier (1981), Rijn (1984) e Soulsby (1997), partindo de um diâmetro mediano efetivo (d_{50}) igual a 0,3mm e de um coeficiente de viscosidade cinemática (ν) igual a $1,36 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, pelo que o valor de A representativo do perfil de equilíbrio foi admitido igual a 0,115. Tendo em conta a morfologia típica das praias da costa Noroeste portuguesa (praias dissipativas) e o clima de agitação energético a que

estão sujeitas, o parâmetro m que melhor se adequa é 2/3. Assim, estima-se ser necessário colocar, em termos médios, cerca de 875m³/m de areia para aumentar 1m a altura do perfil de praia, com um custo de intervenção de 4371€ por metro linear de obra longitudinal aderente.

6.3. Construção de um patamar intermédio

Os patamares intermédios em taludes de obras longitudinais aderentes têm como função principal fazer com que as ondas que atingem diretamente a estrutura, rebentem ao nível do patamar. Desta forma, a energia da ondulação é dissipada previamente e a altura de espraioamento é reduzida, fazendo com que, conseqüentemente, a ocorrência de galgamentos seja mitigada. A Figura 51 representa esquematicamente a tipologia do patamar intermédio considerada neste trabalho.

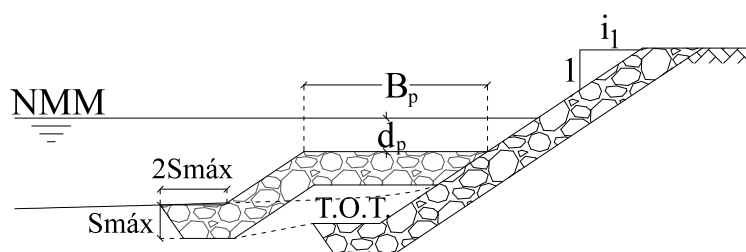


Figura 51 – Perfil transversal tipo de um patamar intermédio, com uma tipologia de risberma adequada para praias sujeitas a clima de agitação energético, segundo CIRIA *et al.* (2007a) e Burcharth e Hughes (2011a).

Seguindo a metodologia de (Waal e van der Meer, 1992), o efeito do patamar é contabilizado através de um coeficiente de redução (γ_p) aplicado à altura de espraioamento máxima ($R_{máx}$). A eficiência do patamar depende da sua largura (B_p) e do seu posicionamento relativamente ao NMM (d_p), sendo que no máximo poderá levar a uma redução de 40% da altura de espraioamento. O coeficiente de redução é determinado a partir das equações 48, 49 e 50, em função das inclinações equivalente (α_{eq}) e média ($\bar{\alpha}$) do patamar, determinadas de acordo com a Figura 52.

$$\gamma_p = 1 - r_p(1 - r_{dp}) \quad 0,6 \leq \gamma_p \leq 1,0 \quad (48)$$

$$r_p = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \bar{\alpha}} \quad (49)$$

$$r_{dp} = 0,5(d_p/H_{proj})^2 \quad 0 \leq r_{dp} \leq 1 \quad (50)$$

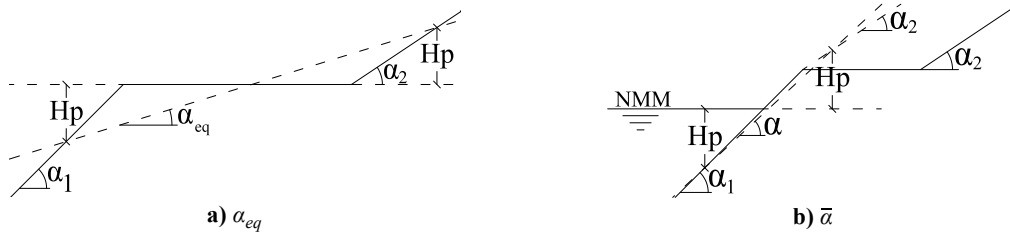
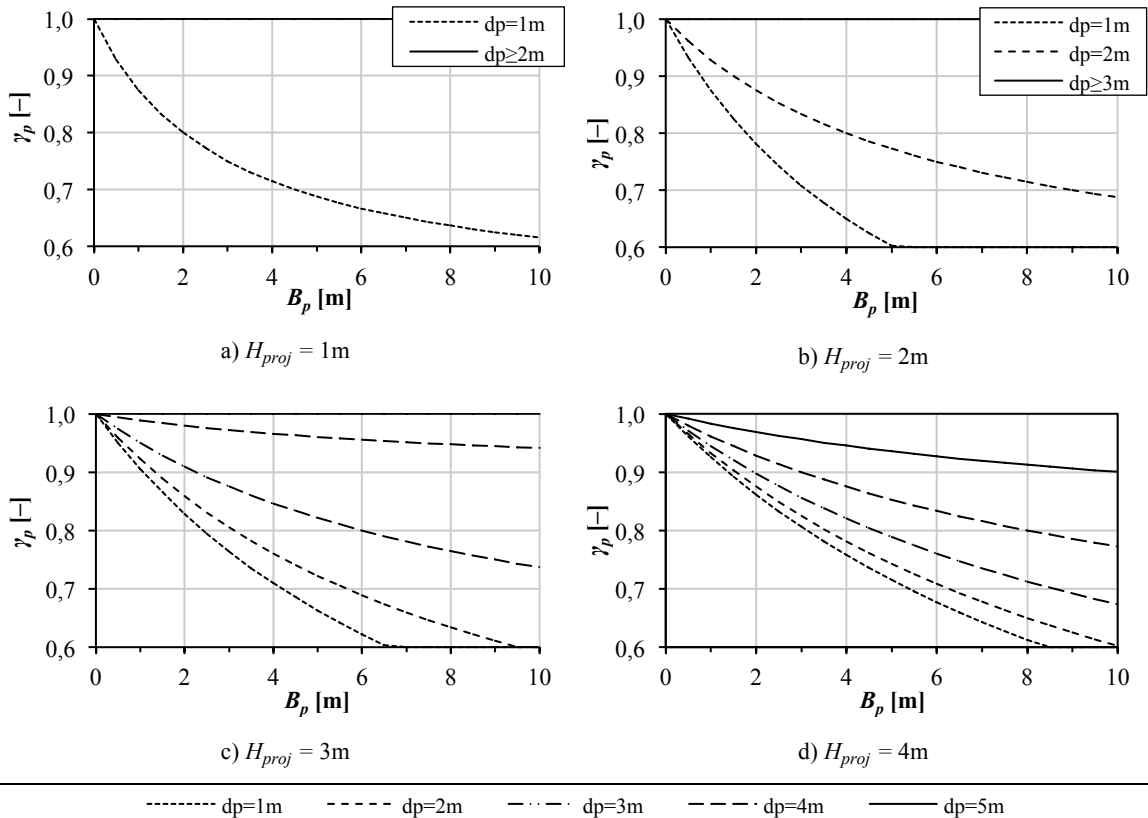


Figura 52 – Representação das inclinações equivalente e média do manto resistente para cálculo do parâmetro r_p .

Segundo Burcharth e Hughes (2011a), a influência do patamar é nula se este estiver posicionado a uma distância maior do que $\sqrt{2}H_{proj}$ abaixo do NMM. Por outro lado, se o patamar estiver posicionado a uma distância maior do que $\sqrt{2}H_{proj}$ acima do NMM, então, quando $B_p/H_{proj} \geq 2$ estima-se que a altura de espraimento seja igual a d_p .

De forma a evitar ter de recorrer aos processos geométricos exemplificados na Figura 52 para determinar o coeficiente de redução de um determinado patamar intermédio, procedeu-se ao cálculo exaustivo de coeficientes de redução para todas as combinações de larguras de patamar até 10m, distância d_p até 5m e alturas de onda de projeto até 10m. A partir deste processo, traçaram-se as curvas da Figura 53, que tornam menos moroso o cálculo da largura mínima e do posicionamento necessário para um patamar intermédio, determinando-se de forma direta o seu coeficiente de redução.



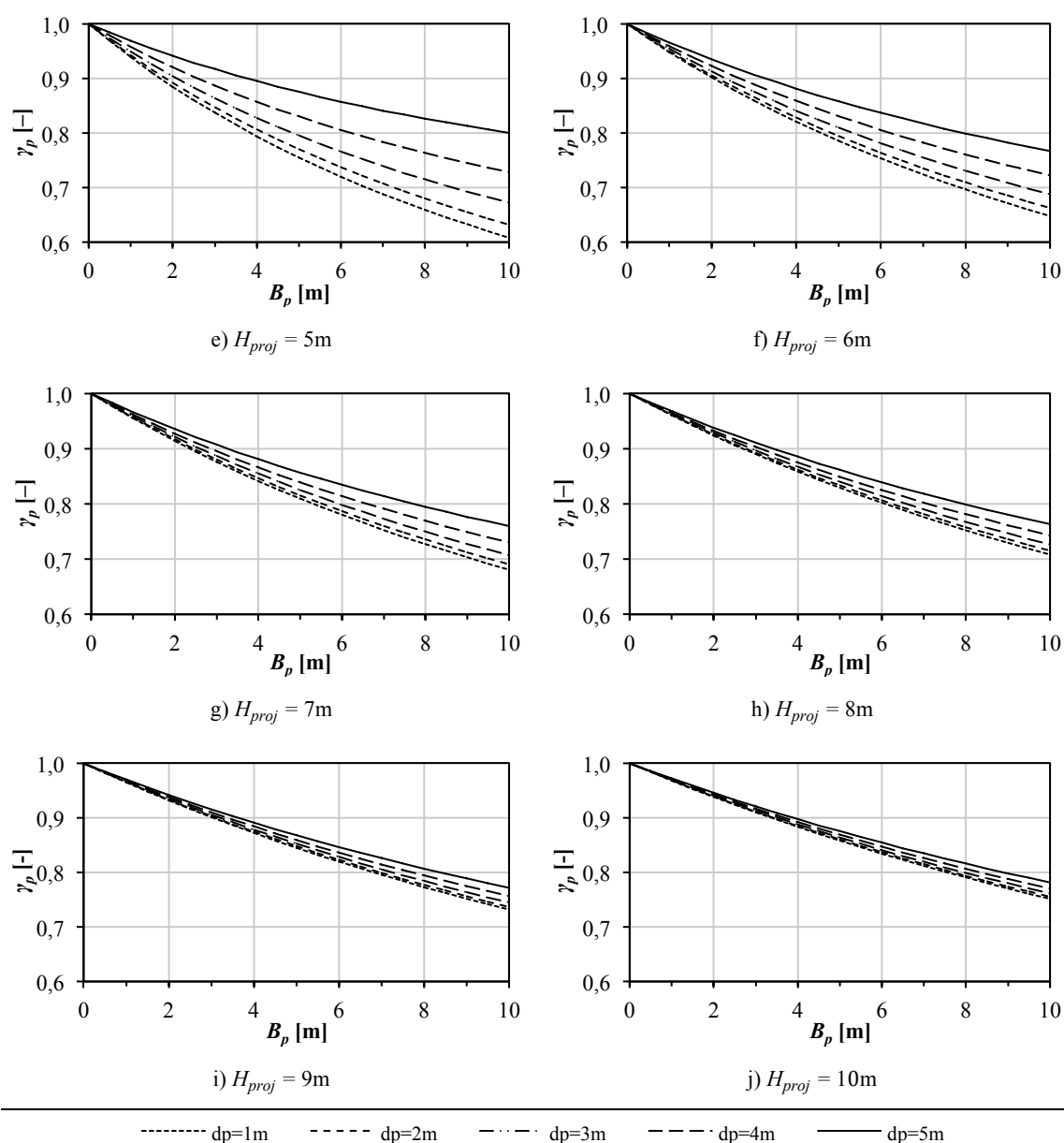


Figura 53 – Ábacos para determinação do coeficiente de redução de um patamar intermédio, a partir das suas características geométricas e da altura de onda de projeto.

Como foi mencionado anteriormente, a diminuição da altura de espraio devido à ação do patamar intermédio resulta numa redução da frequência de galgamentos. Com o objetivo de quantificar esta redução, foi repetido todo o processo de cálculo descrito no capítulo 3, aplicando coeficientes de redução desde 0,6 a 0,9 à equação 13 do espraio máximo. Contabilizaram-se todos os registos de onda que provocariam galgamento, tendo-se obtido os valores percentuais absolutos de redução do número de dias com galgamentos, em função das dimensões da obra longitudinal aderente (d e ΔH) e do coeficiente γ_p (Figura 54).

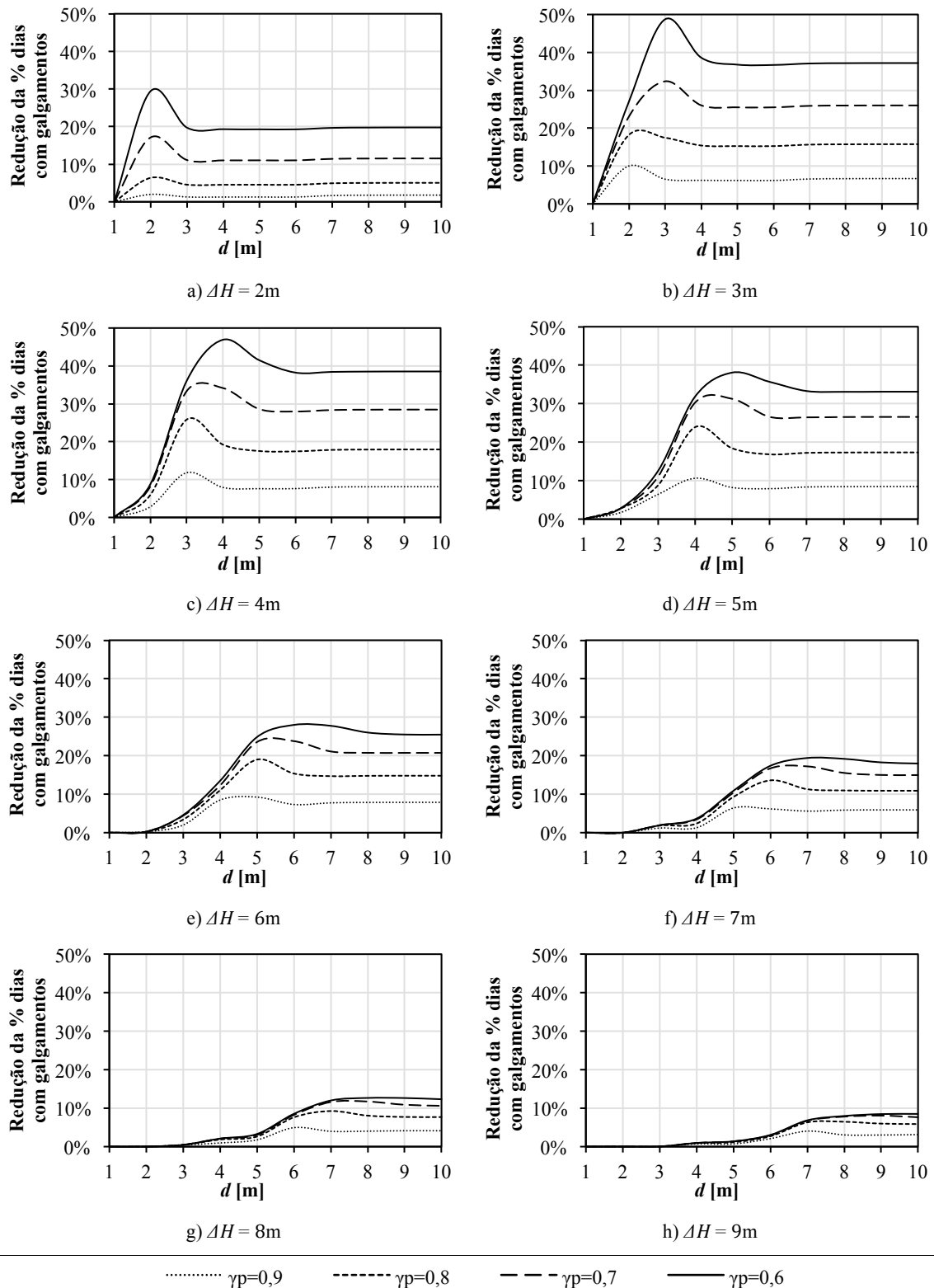


Figura 54 – Influência de um patamar intermédio na redução da frequência de galgamentos de uma obra longitudinal aderente, em função das dimensões (d e ΔH) associadas à obra.

A partir dos ábacos da Figura 54 é possível estimar qual o coeficiente de redução máximo necessário para reduzir uma determinada percentagem de galgamentos. A largura e o posicionamento do patamar necessários para garantir esse coeficiente de redução

máximo, determinam-se a partir dos ábacos da Figura 53, baseados nas equações 48, 49 e 50.

6.3.1. Estimativa de custo

De forma análoga às considerações feitas na estimativa de custo do aumento da cota de coroamento, considera-se que o custo unitário do enrocamento necessário para realizar a intervenção inclui os restantes custos diretos e indiretos inerentes à construção de um patamar intermédio e que o preço unitário do TOT é igual ao do manto resistente. Assim, o custo associado a esta intervenção (C_p), por metro linear de obra longitudinal aderente, pode ser estimado a partir da equação 51, assumindo que a secção transversal do patamar segue a exemplificada na Figura 51: o talude abaixo do patamar tem a mesma inclinação do manto resistente e a risberma apresenta uma profundidade igual à profundidade máxima erodível ($S_{máx}$) e duas vezes a sua largura.

$$C_p = C_u [B_p (d + S_{máx} - d_p) + 2S_{máx}^2] \quad (51)$$

6.3.2. Aplicação ao caso de estudo

No caso da obra longitudinal aderente central do Furadouro ($d_i = 2\text{m}$ e $\Delta H = 4\text{m}$), um patamar intermédio com coeficiente de redução igual a 0,7 evita que hajam galgamentos em 8,2% dos dias do ano (Figura 54c), reduzindo para 0,6% o número de dias com galgamentos após a intervenção. Supondo novamente o cenário de erosão em frente à obra ao longo do tempo, o abaixamento do perfil de praia em 1,35m (secção 5.5.2.2) resulta numa redução efetiva de 33,6% de galgamentos devido ao patamar intermédio, o que, comparando com a frequência de galgamentos sem qualquer intervenção, representa uma percentagem final a longo prazo de 10,2%.

Para conseguir obter um coeficiente de redução igual a 0,7, admite-se um patamar intermédio com 5,5m de largura, posicionado 1m abaixo do nível médio da superfície do mar, perfazendo um custo estimado de 818€ por metro linear da obra aderente.

EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA

7. EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA

As obras de defesa costeira, particularmente as obras longitudinais aderentes, condicionam e modificam a dinâmica sedimentar das zonas costeiras, fixando a posição da linha de costa e afetando diretamente a posição da linha de costa a sotamar. Neste capítulo pretende-se estudar os fenómenos de propagação da erosão e configuração da posição da linha de costa. Com o auxílio do modelo numérico LTC, é analisada a evolução da linha de costa no trecho entre a praia do Furadouro e São Jacinto e para vários cenários de prolongamento de obras aderentes existentes no Furadouro, para fazer face à erosão das zonas adjacentes, obtendo-se como resultados as áreas perdidas, as áreas não perdidas consoante os cenários de intervenção, bem como taxas de recuo da linha de costa.

7.1. Posição da linha de costa

A configuração da orla costeira depende essencialmente da agitação marítima, da orientação da ondulação incidente e da existência de estruturas artificiais ou naturais de posição fixa. A exposição da costa à energia da ação das ondas, correntes e ventos, faz com que a capacidade contínua de transporte sedimentar associada aos balanços sedimentares negativos que resultam da diminuição da quantidade de sedimentos a alimentar as praias, conduza ao recuo da posição da linha de costa (Pereira e Coelho, 2011).

Devido ao sentido norte-sul do transporte sedimentar longitudinal, os maiores problemas de erosão fazem-se sentir na zona Norte de cada trecho costeiro - entre dois pontos fixos da linha de costa. À medida que se verifica a erosão das praias a barlar, os sedimentos daí transportados alimentam as zonas a sotamar, permitindo que estas zonas de sotamar se mantenham em equilíbrio dinâmico. Assim, a variação da configuração da linha de costa é mais lenta nas zonas a sul, induzindo uma tendência natural de “rotação” da linha de costa até assumir a ortogonalidade em relação ao rumo médio do clima de agitação. A longo prazo, a componente longitudinal do rumo de ondulação e a sua capacidade de transporte vão-se anulando. Nesta fase, a linha de costa assume o denominado equilíbrio estático, onde não há variações significativas, quer em termos da sua posição, quer em termos de perfis transversais da praia. A Figura 55 ilustra esquematicamente este processo.

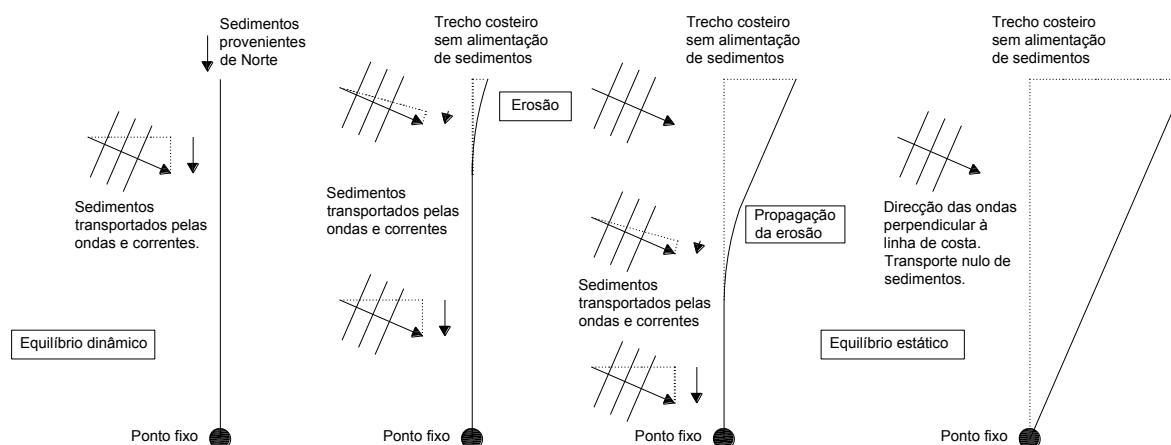


Figura 55 – Esquema caracterizador do fenómeno de propagação da erosão e evolução da linha de costa (Pereira e Coelho, 2013).

Em relação ao trecho costeiro em estudo, a posição da linha de costa tem sofrido grandes modificações ao longo das últimas décadas, com especial relevância após os anos 70 do século XX. Atualmente, existem obras longitudinais aderentes ao longo da praia de Esmoriz que se estendem até meia distância da praia Sul de Cortegaça, fixando a linha de costa. A sul do esporão que separa as praias de Cortegaça e S. Pedro de Maceda, bem como a norte e sul da praia do Furadouro, têm-se verificado recuos acentuados (Figura 56).

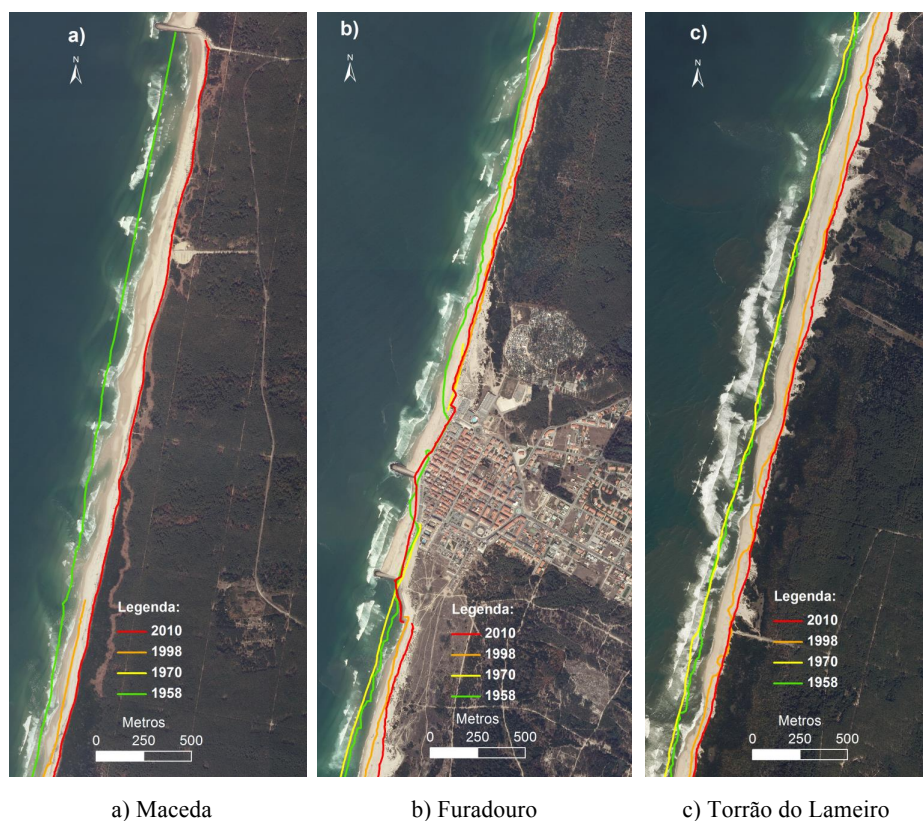


Figura 56 – Linhas de costa do concelho de Ovar desde o ano 1958 (Silva, 2012).

Note-se que as linhas de costa obtidas por Silva (2012) baseiam-se em fotografias aéreas, considerando-se que a linha de costa é a fronteira entre a zona de areal e da vegetação.

7.2. Taxas de recuo

Num período recente e associado à artificialização da linha de costa na zona dos centros urbanos das praias de Esmoriz e Cortegaça, de acordo com Silva (2012), a erosão atinge maior expressão entre a praia de Maceda e a praia do Torrão do Lameiro, localizada já a sul do Furadouro, verificando-se taxas médias de recuo próximas dos 3m/ano. Estima-se que o volume sedimentar associado a este recuo ascenda a cerca de $8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$ (GTL, 2014). Na Figura 57 estão representadas graficamente as taxas de erosão/acreção médias verificadas no trecho Maceda - São Jacinto entre os anos 1958 e 2010.

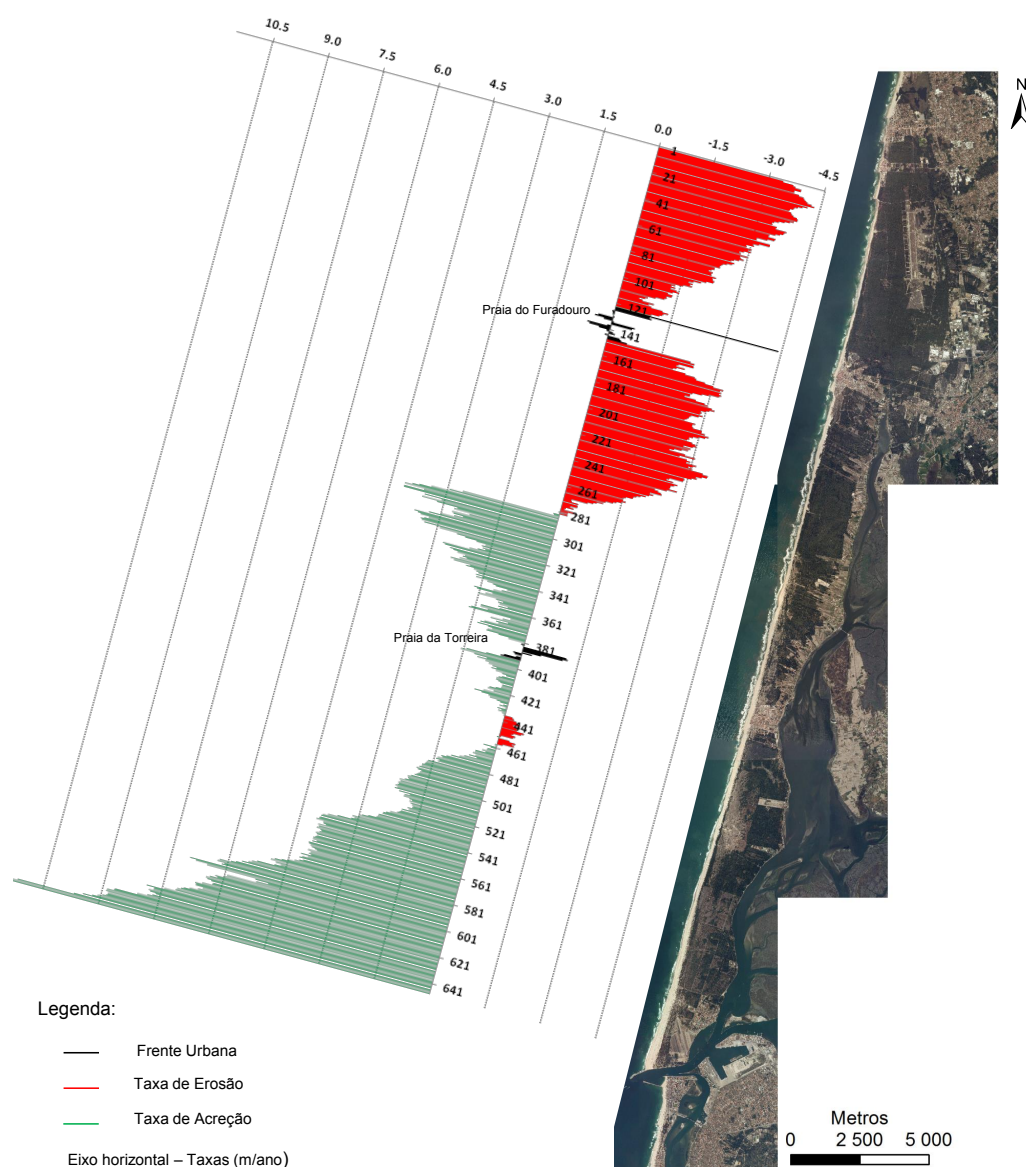


Figura 57 – Taxas de erosão/acreção para o trecho costeiro entre a praia de Maceda e a praia de São Jacinto, espaçadas por transetos de 50m (Silva, 2012).

No entanto, a discrepância de dados existentes na literatura relativos a taxas de variação da posição da linha de costa é considerável. Os intervalos de tempo associados são bastante variáveis e não uniformes, havendo por vezes sobreposições entre períodos de tempo correspondentes a diferentes taxas de variação. Apresentam-se na Tabela 8 alguns valores de taxas médias anuais de variação da posição da linha de costa nas praias do concelho de Ovar, correspondentes a dois períodos de análise (erosão ou recuo da linha de costa associado a valores negativos e acreção a valores positivos).

Tabela 8 – Taxas médias anuais de variação da posição da linha de costa, em metros/ano (adaptado de EUrosion, 2006 e Pereira e Coelho, 2011).

Praia	1954-1980	1978-1992
Esmoriz	-3,7	-5,6
Cortegaça	-3,6	-3,1
Maceda	-3,6	-4,6
Furadouro	-2,8	–

7.3. Modelação numérica com o LTC

A previsão do comportamento da configuração da linha de costa ao longo do tempo é fulcral para o planeamento e gestão das zonas costeiras. Nesse aspeto, a modelação numérica assume um papel importante na medida em que permite a aplicação de teorias de evolução costeira, simulando a evolução das condições de agitação marítima e de dinâmica sedimentar. No entanto, devido à complexidade e variabilidade dos parâmetros físicos envolvidos, os modelos numéricos devem ser utilizados com precaução e, sempre que possível, calibrados com dados de ensaios laboratoriais ou de experiências de campo.

7.3.1. Descrição do modelo numérico

O programa LTC (*Long-Term Configuration*), desenvolvido por Coelho (2005), permite estimar a variação da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo. É aplicável a litorais arenosos constituídos por sedimentos não coesivos e baseia-se no cálculo do transporte sedimentar longitudinal tendo em conta o efeito das ondas, correntes, ventos, níveis de maré, natureza dos sedimentos, bem como as condições fronteira nos extremos da grelha modelada. Com o LTC, é possível modelar um número quase ilimitado de esporões, quebramares, obras longitudinais aderentes, alimentações artificiais e fontes aluvionares pontuais. Dependendo dos dados altimétricos considerados e dos parâmetros de agitação marítima, é possível estudar o comportamento

e impacto direto que cada intervenção de defesa costeira tem na posição da linha de costa, em termos genéricos ou aplicado a zonas de estudo concretas.

Trata-se de um modelo semelhante a um modelo simples de uma linha baseado no cálculo do transporte sedimentar e na equação de continuidade dos volumes de areia movimentados. Admite que a variação do volume de areia entre dois perfis transversais é igual à variação de caudal sólido em transporte nesse comprimento de trecho costeiro, tendo em conta eventuais fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extracções de areia, etc. Este balanço sedimentar resulta numa variação das cotas do perfil ativo, modificando a batimetria e topografia de cada perfil transversal com implicações na posição da linha de costa em cada iteração de cálculo (Coelho, 2005).

Este modelo permite a simulação da propagação de ondas até à costa em função da batimetria tendo em conta o efeito das marés e os fenómenos de empolamento, refração e difração. O volume potencial de transporte de sedimentos pode ser determinado por aplicação da fórmula CERC (Rosati *et al.*, 2002), dependendo essencialmente da altura e orientação das ondas na rebentação, ou da fórmula de Kamphuis *et al.* (1986), que também considera no cálculo a inclinação da praia, o diâmetro médio das areias e o período da onda. A principal diferença do LTC para outros modelos numéricos de uma linha, como o GENESIS ou o LITMOD, é o facto deste considerar que a forma do perfil transversal é variável ao longo do tempo, permitindo simular diferentes perfis em situações de acreção ou erosão.

No âmbito deste trabalho, optou-se por utilizar a fórmula CERC (equação 52) para estimar o caudal sólido longitudinal, devido ao facto de se ter acesso a uma quantidade considerável de registos de agitação marítima das boias ondógrafo do IH. A variabilidade temporal e espacial da inclinação dos fundos e das características dos sedimentos na zona de estudo aumentaria a incerteza dos resultados se a opção de cálculo fosse o uso da formulação de Kamphuis *et al.* (1986).

$$Q = k_c \left(\frac{\gamma_w \sqrt{g}}{16 \sqrt{k_b} (\gamma_s - \gamma_w) (1 - n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b) \quad (52)$$

Em todas as simulações realizadas, assumiram-se as seguintes grandezas intervenientes nesta equação: peso específico da água do mar (γ_w) igual a 10,27kN/m³ correspondente a uma temperatura de 10°C e salinidade de 35‰; peso específico dos sedimentos (γ_s) igual a 26,55kN/m³ com uma porosidade (n) de 40%; e o índice de rebentação (k_b) de

McCowan (1891) igual a 0,78. Em relação aos sedimentos, considerou-se um diâmetro mediano efetivo (d_{50}) igual a 0,3mm e um ângulo de atrito (θ) de 20°.

7.3.2. Análises de sensibilidade

Procedeu-se ao levantamento de cotas batimétricas e topográficas a partir de cartas náuticas (n.º 24201: Caminha a Aveiro e n.º 24202: Aveiro a Peniche) e de cartas militares (n.º 143, 153, 162A, 163, 173, 174, 184 e 185), perfazendo um total de 5621 coordenadas espaciais (Figura 58). A partir da triangulação dessas coordenadas, criou-se uma grelha regular de pontos com espaçamento vertical e horizontal de 50m, servindo de *input* ao LTC. Obteve-se uma grelha com um total de 1017247 pontos cobrindo uma área territorial de cerca de 60x43km² desde Espinho até ao Porto de Aveiro.

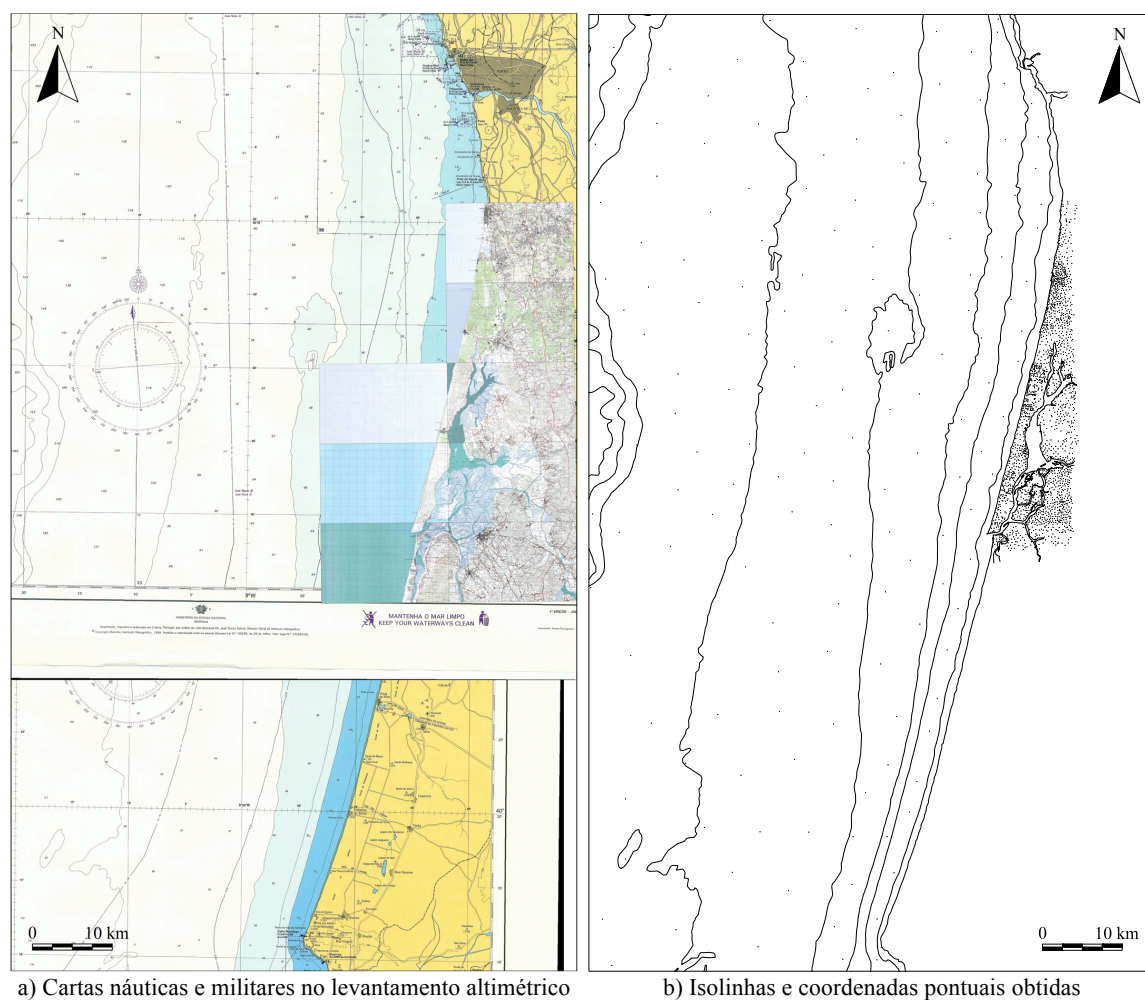


Figura 58 – Levantamento de coordenadas batimétricas e topográficas desde Caminha até Peniche.

Foi feita uma análise de sensibilidade a vários parâmetros de entrada do LTC, realizando-se ao todo 200 simulações, fazendo variar: o parâmetro empírico k_c ; o *time-step* da simulação; e as características da agitação marítima (altura e direção de

propagação das ondas), considerando um regime de ondulação constante ou variável ao longo do prazo da modelação. Nesta análise teve-se como referência as projeções obtidas no âmbito do projeto ADAPTARia (Pereira e Coelho, 2011), na medida em que foram considerados os mesmos dados altimétricos e parâmetros de entrada. As análises de sensibilidade basearam-se em dois horizontes temporais de simulação distintos (20 e 40 anos) e em dois diferentes trechos costeiros (Esmoriz – Furadouro e Furadouro – São Jacinto). As condições de transporte sedimentar nas fronteiras da grelha modelada foram determinadas a partir da ferramenta de extrapolação disponível no *software*, que se baseia na média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes às fronteiras.

O parâmetro k_c , cuja função é calibrar os caudais sólidos longitudinais obtidos pela fórmula CERC, tem uma grande influência nos resultados obtidos, quer em termos de volumes de sedimentos transportados, quer em termos de alterações na posição da linha de costa e, portanto, é de extrema importância na calibração do modelo. Vários autores como Bodge e Kraus (1991), Schoonees e Theron (1993) e Rosati *et al.* (2002) têm sugerido valores para este parâmetro, pelo que foram analisados 4 diferentes valores para k_c : 0,04; 0,02; 0,01; e 0,005.

No caso do LTC, o *time-step* duma simulação é o intervalo de tempo durante o qual a ação de uma determinada onda é aplicada à costa. Devido ao facto dos registos de agitação marítima das boias ondógrafo do IH serem apresentados regularmente, quando não há tempestades, em períodos de 3h, foram analisados apenas 2 *time-steps*: 1h e 3h. Com o objetivo de regularizar o período entre cada registo de agitação, eliminaram-se todos os valores correspondentes a períodos de temporal, permitindo obter uma série de ondas com intervalo de tempo constante de 3h entre registos.

Na Figura 59 estão representadas linhas de costa na zona a sul do Furadouro correspondentes a cada combinação de parâmetros Δt e k_c analisada, considerando um clima de agitação marítima variável. Verifica-se que o resultado mediano corresponde às curvas de cor preta e verde, cujo parâmetro k_c é igual a 0,01.

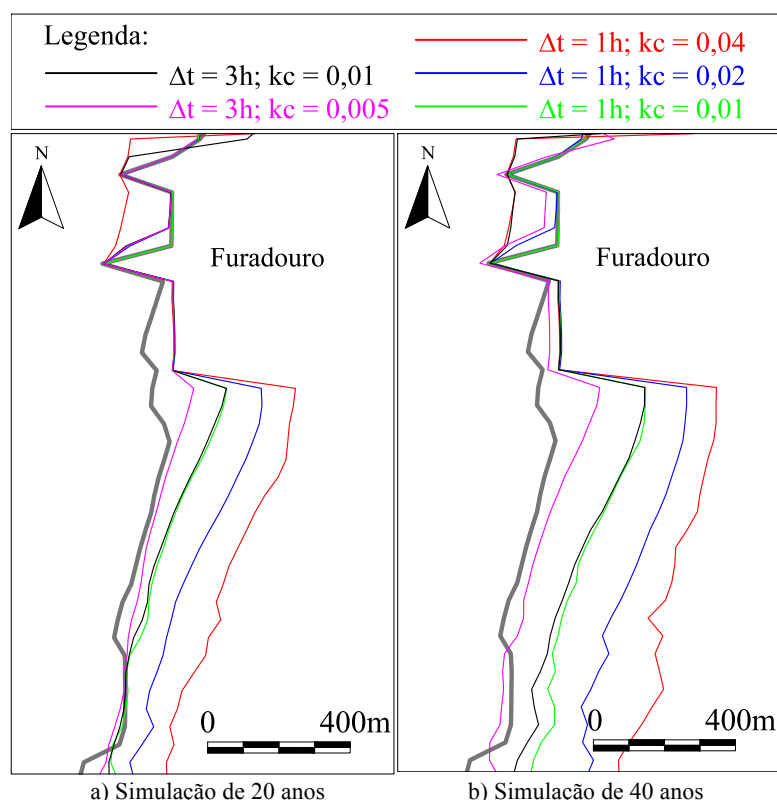


Figura 59 – Linhas de costa a sul do Furadouro modeladas no LTC para um clima de agitação marítima variável, diferentes parâmetros Δt e k_c e horizontes temporais de simulação.

Em termos de clima de agitação marítima, analisaram-se 9 diferentes regimes de ondulação constantes, conjugando alturas de onda de: 1m, 1,5m e 2m e direções de propagação de ondas iguais a: 65°NW, 70°NW e 75°NW. Considerou-se também um clima de agitação variável, partindo-se dos anos com maior frequência e uniformidade de registos da boia ondógrafo de Leixões: desde 2009 até 2014. Dependendo do *time-step* (Δt) e do tempo de simulação (t), repete-se a série de ondas até perfazer o número de ondas necessárias (N_{cal}), isto é, até igualar o número total de passos de cálculo da simulação (equação 53).

$$N_{cal} = 8760 \frac{t}{\Delta t} \quad (53)$$

A Figura 60 reúne as diferentes linhas de costa a sotamar do Furadouro obtidas para os diferentes climas de agitação marítima, mantendo $\Delta t = 3h$ e $k_c = 0,01$. As linhas de costa obtidas para a direção de propagação 70°NW em clima de agitação constante correspondem aos resultados medianos em ambos os tempos de simulação. Verifica-se que o clima de agitação variável apresenta taxas de recuo elevadas, aproximando-se às linhas mais recuadas dos regimes de ondulação constante. Apesar disso, nas simulações da secção 7.3.3 adotou-se o clima de agitação variável devido à maior regularidade das

linhas de costa obtidas e considerando os resultados fiáveis e representativos da zona de estudo.

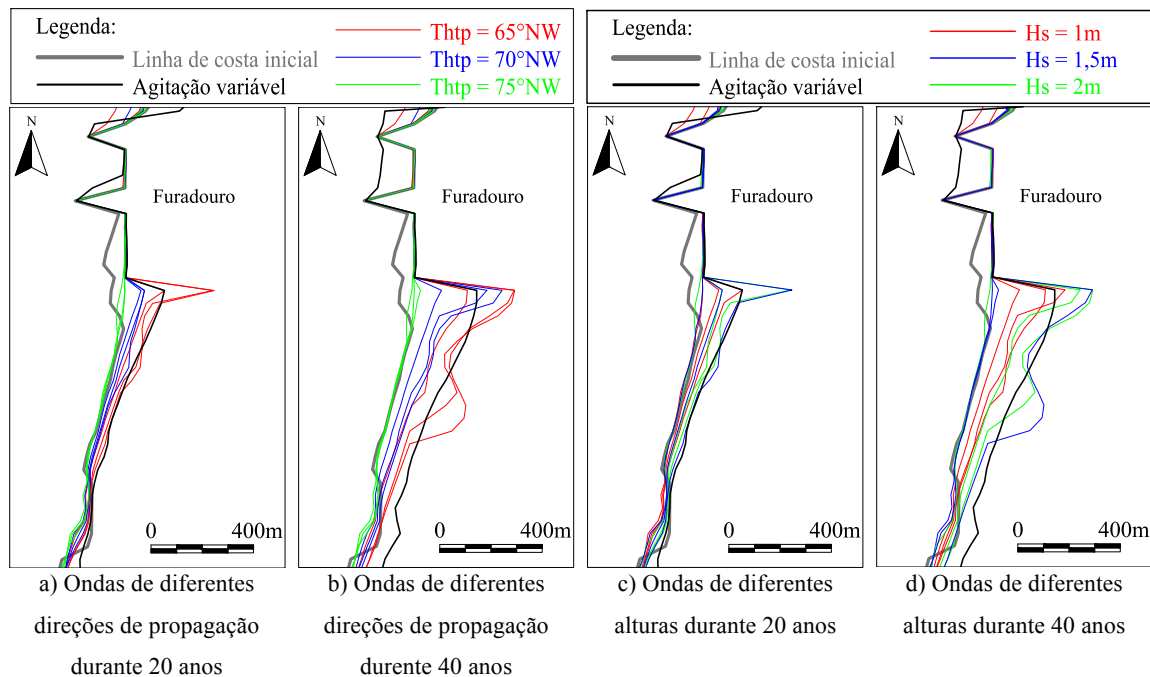


Figura 60 – Linhas de costa a sul do Furadouro modeladas no LTC para diferentes climas de agitação marítima e tempos de simulação de 20 e 40 anos.

Devido ao facto do intervalo de tempo entre registos de onda do clima de agitação variável ser igual a 3h, optou-se por usar um *time-step* (Δt) com a mesma duração, com vista a não modificar a distribuição temporal de cada onda no modelo em relação ao clima de agitação real da boia ondógrafo de Leixões. Em suma, os parâmetros adotados para a simulação dos cenários da secção 7.3.3 são: $k_c = 0,01$; $\Delta t = 3h$ e clima de agitação variável, representativo do que foi observado em Leixões entre 2009 e 2014.

7.3.3. Cenários de prolongamento de obras longitudinais aderentes

As taxas de recuo verificadas no passado e visíveis na Figura 57, nas zonas adjacentes à praia do Furadouro, confirmam a erosão generalizada verificada naquela zona do litoral e fundamentam a crescente frequência de eventos de dano aí registados (subcapítulo 5.5). A fixação da posição da linha de costa através da construção de obras longitudinais aderentes ou do prolongamento de obras já existentes pode ser uma solução viável para fazer face a este problema. Pretende-se tirar ilações acerca da eficiência deste tipo de estruturas no combate à erosão a partir da simulação por modelação numérica do impacto que estas têm na posição da linha de costa ao longo do tempo. A distância máxima a sotamar a que se faz sentir o impacto da construção de obras longitudinais aderentes em

termos de transporte sedimentar, é de difícil quantificação pois depende de diversos fatores dinâmicos e variáveis ao longo do tempo, cuja previsão é complexa (e.g. capacidade de transporte longitudinal e transversal da ondulação, heterogeneidade de sentidos de corrente, velocidades de transporte por arrastamento e suspensão, impacto da reflexão das ondas na estrutura sobre o caudal sólido, etc.). Com vista a estudar cenários de prolongamento de obras longitudinais aderentes, tendo como caso de estudo a praia do Furadouro (zona Sul), adotou-se um trecho costeiro de 5km de extensão, localizado a sotamar da obra longitudinal existente no Furadouro.

Considerando como cenário 0, aquele em que não há qualquer prolongamento da estrutura, mantendo-se apenas as estruturas existentes, foram admitidos outros 5 cenários distintos considerando o prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro em: 500m no ano inicial (cenário 1); 1000m no ano inicial (cenário 2); 500m no ano 20 (cenário 3); 1000m no ano 20 (cenário 4); 500m no ano inicial e outros 500m no ano 20 (cenário 5). A modelação dos cenários em LTC em horizontes temporais de 20 e 40 anos permitiu obter as linhas de costa da Figura 61.

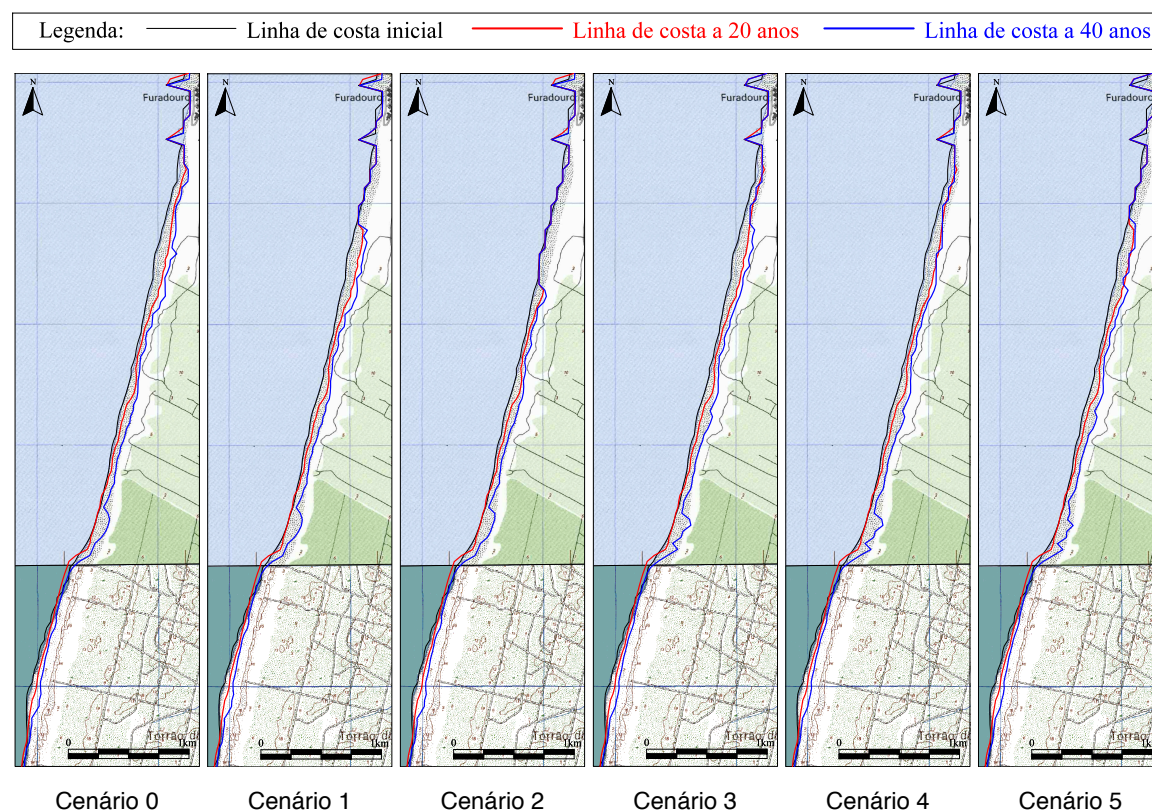


Figura 61 – Projeções de linhas de costa a 20 e a 40 anos relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.

Em todas as projeções a 40 anos, verifica-se uma pequena instabilidade na linha de costa a cerca de 3km a sul do Furadouro. Isto deve-se a uma menor representatividade da altimetria das cartas militares nesta zona, refletindo-se numa zona de cotas baixas, o que faz com que a triangulação da superfície do terreno para definição de uma malha regular de pontos exporte coordenadas que propiciam pequenas irregularidades nas linhas de costa modeladas, como resultado de maiores erosões.

No entanto, estas irregularidades são comuns aos diversos cenários, pelo que não são consideradas relevantes na análise comparativa de cenários. Constatou-se que não existem diferenças consideráveis de posicionamento das linhas de costa entre os diferentes cenários, pelo que se pode aferir que o impacto da construção ou prolongamento de obras longitudinais aderentes na dinâmica sedimentar das zonas a sotamar é reduzido. As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados obtidos em termos de balanços de áreas territoriais e de taxas de erosão/acreção.

Tabela 9 – Áreas perdidas e não perdidas numa extensão de 5km de costa, relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.

	Áreas perdidas [ha]			Áreas não perdidas [ha]		
	2015 - 2035	2035 - 2055	Total	2015 - 2035	2035 - 2055	Total
Cenário 0	16,05	20,28	36,32	–	–	–
Cenário 1	13,17	18,55	31,72	2,88	1,72	4,60
Cenário 2	8,94	15,66	24,60	7,10	4,62	11,72
Cenário 3	16,05	19,39	35,44	–	0,89	0,89
Cenário 4	16,05	17,83	33,88	–	2,45	2,45
Cenário 5	13,17	17,70	30,87	2,88	2,58	5,46

Tabela 10 – Taxas de recuo médias verificadas num trecho até 5km a sul do Furadouro, relativas aos diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro.

	Taxa média de recuo [m/ano]		
	2015 - 2035	2035 - 2055	Total
Cenário 0	1,60	2,03	1,82
Cenário 1	1,32	1,86	1,59
Cenário 2	0,89	1,57	1,23
Cenário 3	1,60	1,94	1,77
Cenário 4	1,60	1,78	1,69
Cenário 5	1,32	1,77	1,54

Os cenários em que se verificam maiores perdas territoriais são, por ordem crescente de áreas perdidas, o cenário: 3, 4, 1, 5 e 2. Como era espectável, conclui-se que, em termos

de áreas não perdidas, a eficiência da fixação da linha de costa através de obras longitudinais aderentes é tanto maior, quanto mais extenso for o trecho protegido e quanto mais antecipada for a intervenção de construção ou prolongamento. A viabilidade económica destes cenários será analisada no subcapítulo 8.3.

ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

8. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

Uma análise custo-benefício permite avaliar o impacto económico líquido de um projeto ao longo do tempo, através da identificação e contabilização de todos os seus custos e benefícios. Aplica-se sobretudo a projetos de grande envergadura em diversos setores de atividade (saúde, transportes, ambiente, etc.), onde é mais fácil quantificar e converter em unidades monetárias os efeitos não mercantis (Reis, 2010), podendo servir de fundamento a eventuais decisões estratégicas e políticas. No entanto, nem todos os impactos podem ser sempre quantificados e avaliados e, por isso, muitas vezes é necessário estabelecer critérios que permitam antecipar as tendências de evolução ao longo do tempo de alguns encargos e receitas inerentes ao projeto. Neste capítulo pretende-se fazer a análise custo-benefício de obras longitudinais aderentes estudando dois tipos de abordagens distintas: intervenções para reduzir a frequência de galgamentos (baseada nas tipologias de intervenção referidas no capítulo 6) e prolongamento da estrutura para fazer face à erosão e à perda de território (baseada nos cenários avaliados na secção 7.3.3).

8.1. Metodologia

O balanço entre custos e benefícios ao longo de determinado período de tempo deve ter em conta a atualização financeira de todos os valores monetários em relação a um ano de referência. Para isso, todos os valores monetários (V) devem ser convertidos em valores atualizados (VA) aplicando uma taxa de desconto (r), segundo a equação 54 (Zerbe e Dively, 1994). No âmbito deste trabalho assumiu-se uma taxa de desconto constante e igual a 3%.

$$VA_t = \frac{V_t}{(1 + r)^t} \quad (54)$$

Os valores nominais e atuais de custos designam-se por VC e VAC , respetivamente. De forma análoga, os valores nominais e atuais de benefícios designam-se por VB e VAB . A verificação da sustentabilidade económica de uma intervenção é feita a partir dos fluxos líquidos acumulados de benefícios e custos. Portanto, a viabilidade económica de cada cenário em análise num determinado período de tempo (t) é avaliada a partir do valor atual líquido (VAL) e do rácio benefício-custo (RBC), calculados segundo as equações 55 e 56, respetivamente. O VAL representa o balanço acumulado entre os benefícios e os custos atuais, pelo que assume valores positivos sempre que a intervenção é

economicamente viável, existindo uma predominância dos benefícios em relação aos custos atuais. O *RBC* de um projeto é a relação entre o somatório dos valores atuais de benefícios e os valores atuais de custos, sendo que a intervenção é rentável em termos económicos quando o *RBC* é superior a 1.

$$VAL_t = \sum_{i=0}^t VAB_i - \sum_{i=0}^t VAC_i = \sum_{i=0}^t \frac{VB_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=0}^t \frac{VC_i}{(1+r)^i} \quad (55)$$

$$RBC_t = \sum_{i=0}^t VAB_i / \sum_{i=0}^t VAC_i = \sum_{i=0}^t \frac{VB_i}{(1+r)^i} / \sum_{i=0}^t \frac{VC_i}{(1+r)^i} \quad (56)$$

8.2. Intervenções para reduzir galgamentos

O estudo prévio de diferentes alternativas de intervenção na obra longitudinal aderente central do Furadouro, desenvolvido no capítulo 6, permitiu obter estimativas para os custos de intervenção e para a respetiva eficiência em termos de redução da frequência de galgamentos, tendo como base os resultados dos capítulos 3 e 4 e da secção 5.5.2 (onde se estudou a frequência de galgamentos das obras longitudinais aderentes). Adicionalmente, a análise custo-benefício desenvolvida neste subcapítulo aplicada a cada uma das alternativas de intervenção permite aferir de forma direta qual a viabilidade económica de cada opção numa avaliação a médio prazo, tendo-se admitido um prazo máximo da análise de 40 anos (entre 2015 e 2055).

8.2.1. Cenários e pressupostos

À semelhança do que foi considerado por Cruz *et al.* (2015), foram admitidos 4 cenários diferentes: cenário 0, onde não há qualquer intervenção na obra longitudinal aderente; cenário 1, correspondente ao aumento da cota de coroamento (tipologia descrita no subcapítulo 6.1); cenário 2, relativo à alimentação artificial do perfil de praia (redução da profundidade do perfil em frente à obra longitudinal aderente, conforme referido no subcapítulo 6.2); e cenário 3, associado à construção de um patamar intermédio no talude exposto da estrutura (subcapítulo 6.3). Assumiu-se que todas as intervenções são realizadas no ano inicial (2015) e que não se repetem no tempo, ou seja, cada cenário de intervenção apresenta um custo inicial fixo no ano de referência. Nesta análise, os benefícios associados a cada cenário correspondem à diferença de custos em relação ao cenário de referência (cenário 0), onde não é feita qualquer intervenção.

Especificamente para o caso da obra aderente do Furadouro, para além dos custos diretos de cada tipo de intervenção, pretende-se ao longo do período em análise contabilizar todos os custos inerentes: à sua reabilitação ou manutenção (*e.g.* construção de banquetas de fundação, reforço de patamares, aumento do peso dos blocos, reforço de coroamentos, aprofundamento das cotas de fundação, betonagem de juntas, etc.); à limpeza da via pública e reparação de infraestruturas devido aos galgamentos; e às perdas de bens materiais privados e danos em edificado consequentes de inundações. A Tabela 11 sumariza todos estes encargos, estimados com base no trabalho descrito nos capítulos 5 e 6. A tabela inclui ainda uma estimativa da frequência de galgamentos inicial, pós-intervenção e final, em função de cada cenário de intervenção adotado. Como já foi referido, atualmente estima-se em 8,8% a frequência de dias com galgamentos no Furadouro. A intervenção a realizar permite reduzir significativamente esse valor imediatamente após a intervenção, mas ao longo dos 40 anos de análise e devido ao processo de afundamento do perfil de praia em frente à obra, a frequência de galgamentos tenderá a aumentar novamente. Para facilitar e enquadrar o leitor, indica-se a secção do trabalho onde foi estimado e onde se descreveu a metodologia para a obtenção de cada valor apresentado na tabela.

Tabela 11 – Valores considerados na análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção na obra longitudinal aderente central do Furadouro como objetivo de reduzir galgamentos.

		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Custos	Intervenção	318 000,00€ (secção 6.1.1)	2 317 000,00€ (secção 6.2.1)	435 000,00€ (secção 6.3.1)
	Reabilitação ou manutenção	263 000,00€/ano (cerca de 500€/m/ano) (secção 5.6.2)		
	Limpeza da via pública e reparação de infraestruturas	30 000,00€/ano (secção 5.6.2)		
	Danos em bens privados e em edificado	210 000,00€/ano (secção 5.5.3)		
Frequência de galgamentos [% de dias no ano]	Inicial	8,8% (subsecção 5.5.2.1)		
	Pós-intervenção	0,3% (secção 6.1.2)	0,0% (secção 6.2.2)	0,6% (secção 6.3.2)
	Final	7,6% (secção 6.1.2)	13,3% (secção 6.2.2)	10,2% (secção 6.3.2)

Todos os custos estimados estão associados a diversos fatores dinâmicos (características da agitação marítima, dinâmica sedimentar, frequência de galgamentos, caudal galgado, grau de exposição das frentes urbanas, valor patrimonial de bens e edifícios, entre muitos

outros) que os tornam variáveis ao longo do tempo e que fazem com que a previsão da sua evolução seja complexa e difícil. Para facilitar e simplificar essas variáveis, foi admitida uma série de premissas que permite antecipar as variações de custos. Desta forma, os encargos consequentes dos galgamentos (limpeza da via pública, reparações de infraestruturas e danos em bens privados e em edificado) foram considerados diretamente proporcionais à frequência anual de galgamentos. Assim, faz-se variar cada encargo ao longo do tempo ao mesmo ritmo da frequência de galgamentos, estando cada valor base associado à frequência do ano de referência (2015). Por outro lado, também os custos de reabilitação das obras longitudinais aderentes variam consoante o grau de exposição direta ao impacto da ondulação, tendo-se assumido que 20% do custo varia proporcionalmente com a percentagem de dias com galgamentos (cerca de 100€/m/ano considerando os 530m de extensão das obras aderentes do Furadouro) e os restantes 80% (400€/m/ano) são permanentes ao longo do tempo.

A variação da frequência de galgamentos depende da profundidade máxima de erosão ($S_{máx}$) e da taxa de abaixamento do perfil de praia. No entanto, face à incerteza relativa à estimativa do tempo de abaixamento do fundo até se atingir a profundidade máxima de erosão e o perfil de equilíbrio, assumiram-se três diferentes tempos de estabilização do perfil de praia (t_e): 0 anos (não há abaixamento porque o perfil já atingiu o equilíbrio); 20 anos (o perfil de praia atinge a profundidade máxima erodível em 20 anos e depois mantém-se fixo); 40 anos (a profundidade máxima é atingida ao fim do período de análise). Por simplificação, as taxas de abaixamento do fundo do perfil foram consideradas constantes, ou seja, a variação da profundidade em frente à obra e a variação da frequência de galgamentos foi assumida como linear ao longo do tempo.

8.2.2. Resultados

A Tabela 12 apresenta os valores atualizados de custos acumulados do cenário 0 ao longo do tempo (40 anos de análise) para os diferentes tempos de estabilização do perfil de praia (t_e). Estes custos servem de referência à estimativa de benefícios que resultam dos restantes cenários de intervenção. A Tabela 13 sumariza os resultados obtidos para os custos e benefícios dos diferentes cenários de intervenção considerados, cujos rácios benefício-custo (RBC) e os valores atuais líquidos (VAL) são representados na Figura 62, para os três tempos de estabilização do perfil de praia considerados.

Tabela 12 – Valores atuais de custos acumulados [M€] do cenário 0 (sem intervenção na obra aderente), por períodos de tempo de 10 anos e para tempos de estabilização do perfil de praia (t_e) iguais a 0, 20 e 40 anos.

Ano	$t_e = 0$	$t_e = 20$	$t_e = 40$
2015	0,50	0,50	0,50
2025	4,79	7,39	6,09
2035	7,99	16,19	12,09
2045	10,36	24,04	17,92
2055	12,13	29,88	23,28

Tabela 13 – Valores da análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção para reduzir galgamentos, para tempos de estabilização do perfil de praia (t_e) iguais a 0, 20 e 40 anos.

		$t_e = 0$				$t_e = 20$				$t_e = 40$			
		VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]	VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]	VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]
Cenário 1	2015	0,82	0,00	-0,82	0,00	0,82	0,00	-0,82	0,00	0,82	0,00	-0,82	0,00
	2025	2,70	2,41	-0,29	0,89	3,16	4,51	1,35	1,43	2,92	3,46	0,53	1,18
	2035	4,10	4,20	0,10	1,02	5,71	10,71	5,00	1,88	4,88	7,46	2,58	1,53
	2045	5,15	5,54	0,39	1,08	7,89	16,33	8,44	2,07	6,64	11,51	4,88	1,73
	2055	5,92	6,53	0,61	1,10	9,52	20,51	11,00	2,16	8,16	15,32	7,16	1,88
Cenário 2	2015	2,82	0,00	-2,82	0,00	2,82	0,00	-2,82	0,00	2,82	0,00	-2,82	0,00
	2025	4,90	2,20	-2,70	0,45	5,46	4,21	-1,25	0,77	5,03	3,35	-1,69	0,67
	2035	6,91	3,36	-3,55	0,49	8,89	9,53	0,64	1,07	7,39	6,95	-0,44	0,94
	2045	8,76	3,88	-4,89	0,44	11,96	14,27	2,31	1,19	9,68	10,47	0,79	1,08
	2055	10,40	4,00	-6,40	0,38	14,24	17,79	3,55	1,25	11,77	13,70	1,92	1,16
Cenário 3	2015	0,94	0,00	-0,94	0,00	0,94	0,00	-0,94	0,00	0,94	0,00	-0,94	0,00
	2025	2,91	2,30	-0,60	0,79	3,51	4,28	0,77	1,22	3,20	3,30	0,10	1,03
	2035	4,37	4,02	-0,36	0,92	6,48	10,06	3,57	1,55	5,40	7,06	1,66	1,31
	2045	5,47	5,29	-0,17	0,97	9,07	15,27	6,20	1,68	7,42	10,84	3,42	1,46
	2055	6,28	6,24	-0,04	0,99	10,99	19,15	8,16	1,74	9,21	14,38	5,17	1,56

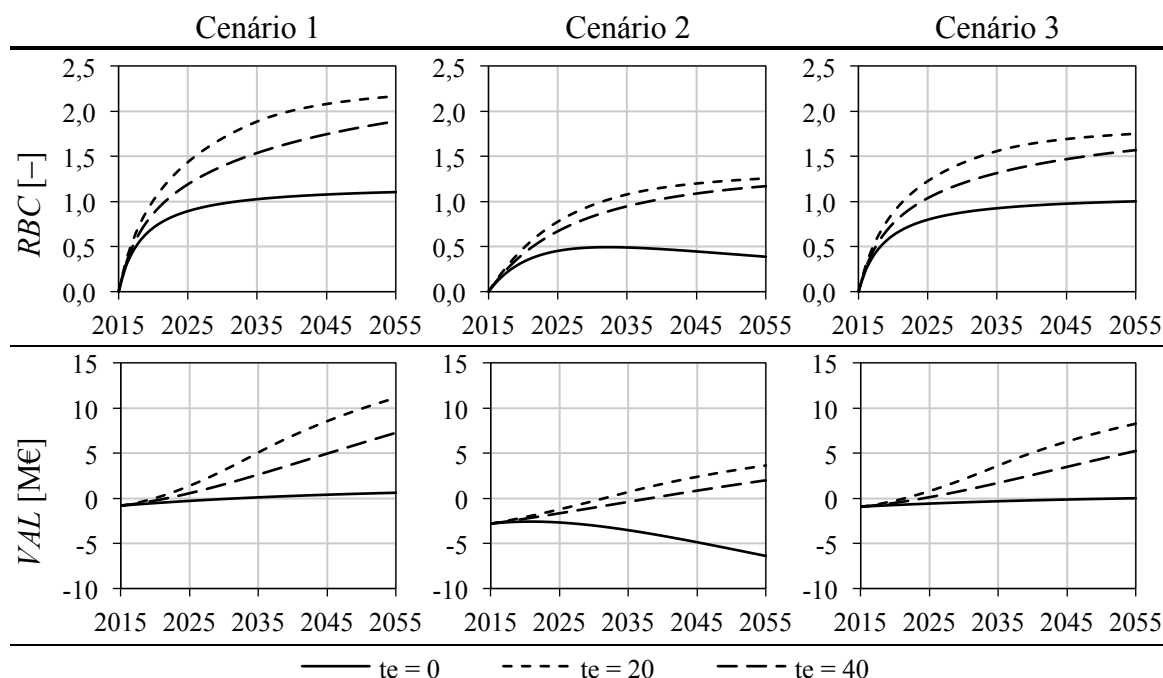


Figura 62 – Rácios benefício-custo e valores atuais líquidos ao longo do tempo, para tempos de estabilização do perfil de praia iguais a 0, 20 e 40 anos.

8.2.3. Análise crítica

Caso não se realize qualquer tipo de intervenção para reduzir os galgamentos (cenário 0), o total dos custos associados à reabilitação das obras aderentes e às inundações no Furadouro pode, no pior dos cenários, ascender a quase 30 milhões de euros num prazo de 40 anos (Tabela 12 para $t_e = 20$ anos), o que em termos médios perfaz um custo anual de cerca de 750 mil euros. Esta estimativa não tem em conta o eventual abandono populacional, o decréscimo do valor recreativo das praias, nem o impacto em termos turísticos e no valor imobiliário que advém da perda de areal e dos galgamentos, danos e inundações frequentes das obras aderentes.

Com base nos pressupostos de intervenção considerados, em termos económicos, verifica-se que o cenário 2 é o menos favorável, correspondente à alimentação artificial do perfil de praia, independentemente do tempo de estabilização do perfil. Está a assumir-se apenas uma alimentação ao longo dos 40 anos de análise, pelo que não foram analisados cenários de alimentações artificiais do perfil de praia com periodicidade de intervenção e volumes de areia mais reduzidos, nem foram tidos em conta os impactos positivos que este tipo de intervenção tem nas zonas costeiras a sotamar devido à alimentação sedimentar e consequente mitigação da erosão. Por outro lado, também não foram contabilizados os efeitos positivos da manutenção do areal das praias, quer em termos de valor recreativo, quer em termos de incentivo turístico, comercial e habitacional na zona urbana do Furadouro. O resultado menos atrativo da alimentação artificial deve-se não só ao facto do custo de intervenção ser bastante avultado (2,3M€), mas também porque a alteração da profundidade de fundo induz instabilidade no perfil de praia, o que faz com que sejam inevitáveis novos abaixamentos, mesmo no cenário em que à partida se considerava o equilíbrio ($t_e = 0$). No entanto, no caso do perfil de praia não estar estável (como deverá ser o caso da zona de estudo, tendo em conta as taxas de recuo registadas nos últimos anos), a alimentação artificial é viável economicamente (VAL entre 1,9M€ a 3,6M€ em 2055), com um *break-even* entre 7 e 14 anos (ponto de equilíbrio entre o total de benefício e de custos atualizados, onde o $VAL = 0$ e o $RBC = 1$).

De acordo com as tipologias adotadas, os cenários 1 e 3, correspondentes a intervenções de reforço das obras longitudinais aderentes, são economicamente viáveis qualquer que seja o tempo de estabilização do perfil de praia. Caso haja abaixamento do fundo em frente à obra, aumentar a cota de coroamento pode resultar em valores atuais líquidos entre os 7,2M€ e os 11,1M€ num prazo de 40 anos, com um *break-even* imediato entre 3

a 5 anos. A construção de um patamar intermédio também apresenta boa viabilidade económica a curto e a médio prazo, com valores líquidos positivos a partir de 7 a 10 anos após a intervenção e com resultados entre os 5,2M€ e 8,3M€ a 40 anos. Verifica-se uma rentabilidade superior no cenário 1, devido ao menor custo de intervenção e à maior eficiência na redução dos galgamentos. No entanto, não foram tidos em conta os impactos sociais e económicos referentes ao bloqueio visual e paisagístico do aumento da altura de coroamento ao longo da estrutura marginal ao mar, pelo que se considera que o cenário 1 possa ser encarado como menos favorável relativamente ao cenário 3.

Independentemente do tempo de estabilização do perfil de praia, conclui-se que intervir em obras longitudinais aderentes que são galgadas frequentemente é geralmente viável em termos económicos a médio prazo, principalmente quando se antevê um agravamento da frequência de galgamentos. A mitigação de custos associados aos impactos negativos dos galgamentos tende a rentabilizar o investimento inicial com períodos de retorno na ordem dos 10 anos, sendo que o retorno é tanto maior quando mais eficiente for a intervenção. Por isso, é essencial que a escolha da solução seja bem fundamentada de forma a garantir a viabilidade económica a longo prazo.

8.3. Prolongamento de obras longitudinais aderentes

Com base na modelação numérica da evolução da posição da linha de costa realizada no subcapítulo 7.3, constatou-se que as obras longitudinais aderentes são eficazes na fixação da linha de costa, verificando-se que as áreas não perdidas por efeito da erosão são tanto maior, quanto mais extensa for a estrutura e mais antecipado no tempo for o seu prolongamento ou construção. Assim, interessa perceber se o uso de obras longitudinais aderentes para fazer face à erosão é ou não viável economicamente, ou seja, se o custo avultado de construção destas estruturas é compensatório em relação ao valor das áreas que protegem.

8.3.1. Cenários e pressupostos

A análise custo-benefício do prolongamento de obras longitudinais aderentes tem como caso de estudo a obra aderente sul do Furadouro e, como tal, baseia-se nos resultados obtidos nas modelações numéricas da linha de costa realizadas no capítulo anterior. Portanto, mantendo o prazo máximo da análise custo-benefício de acordo com os 40 anos do tempo de simulação projetado com recurso ao modelo LTC, consideram-se 5

diferentes cenários de prolongamento da estrutura: 500m em 2015 (cenário 1); 1000m em 2015 (cenário 2); 500m em 2035 (cenário 3); 1000m em 2035 (cenário 4); 500 em 2015 e outros 500m em 2035 (cenário 5). O cenário 0 corresponde à situação de não haver qualquer prolongamento da obra aderente, considerando-se apenas as estruturas de defesa costeira já existentes. Portanto, os benefícios inerentes a cada cenário correspondem à diferença de custos em relação ao cenário 0, definido como cenário de referência para a contabilização dos benefícios.

A estimativa do custo de construção de obras longitudinais aderentes não é simples, uma vez que depende das várias características da estrutura e da empreitada, tornando complexa a sua avaliação. Assumiu-se um preço unitário de 8000€ por metro linear de comprimento de obra longitudinal aderente, valor este que tem como base vários preços globais de intervenções de defesa costeira compiladas por Reis (2010) e que vai também ao encontro do custo de construção assumido por Roebeling *et al.* (2015) na análise que desenvolveram.

Para além dos custos de construção das obras aderentes, também os custos relativos a intervenções de manutenção e reabilitação destas estruturas devem ser contabilizados. Muitos autores estimam estes encargos seguindo uma abordagem que tem como base um custo fixo de intervenção com uma determinada periodicidade média. No entanto, devido ao facto de se ter compilado uma base de dados de registos de intervenções de reabilitação especificamente para as obras aderentes do Furadouro (subcapítulo 5.6), optou-se por considerar um valor fixo anual de 400€ por metro linear de estrutura (Tabela 6), à semelhança das considerações feitas na análise custo-benefício das intervenções no perfil transversal com o objetivo de reduzir galgamentos. Ao contrário da análise anterior, desprezou-se a parcela de 20% dos custos de reabilitação referente aos danos provocados pelos galgamentos, tendo-se também assumido que estes encargos são invariáveis no tempo, ou seja, que eventuais variações do grau de exposição à agitação marítima devido ao abaixamento do perfil de praia não resultam em agravamentos significativos da frequência e dimensão das intervenções de reabilitação ao longo do tempo. Esta assunção simplifica o processo e é plausível caso não se verifiquem galgamentos das obras aderentes construídas.

Outro aspeto importante a referir é a contabilização do valor territorial e patrimonial. A atribuição de um valor económico ao território deve ter em conta, entre outros fatores, o tipo de uso de solo existente e a densidade e tipologia do edificado dos centros urbanos.

Vários autores, como Alves *et al.* (2009), Roebeling *et al.* (2012), ou de Groot *et al.* (2012) têm desenvolvido trabalho nesta área com o intuito de quantificar o valor territorial em função das tipologias de utilização. As cartas de uso e ocupação do solo (DGT, 2007) permitem identificar as tipologias de utilização do território.

Tendo em conta que no horizonte de 40 anos, o recuo máximo das linhas de costa modeladas é de cerca de 150m, verifica-se que, num trecho de 5km a sul do Furadouro, a área perdida é abrangida maioritariamente por praias arenosas. O valor estimado dessas áreas vai desde os 21 830€/ha/ano (Alves *et al.*, 2009, e Reis, 2010), aos 18 394€/ha/ano (de Groot *et al.*, 2012, e Roebeling *et al.*, 2015). Posto isto, assumiu-se que as zonas de praia apresentam um valor base médio de 20 000€/ha/ano.

No entanto, a ocupação territorial não é constante ao longo do tempo e consequente, o respetivo valor patrimonial pode sofrer alterações. No caso específico das zonas costeiras, tem existido ao longo dos anos uma tendência de expansão gradual dos centros urbanos. Face a esta incerteza, estabeleceram-se duas abordagens distintas: não há expansão da área urbana da praia do Furadouro para as zonas a sul e, por isso, o valor territorial mantém-se nos 2€/m²/ano (20 000€/ha/ano) ao longo do período da análise custo-benefício (abordagem 1); existe expansão do centro urbano, fazendo o valor territorial das áreas a sul variar uniformemente até igualar o valor atual da marginal da praia do Furadouro (abordagem 2). Para isso, tomou-se como referência o valor de 1447,67€/m² (Fontão, 2008) referente à faixa de 100m da marginal do Furadouro usado anteriormente para contabilizar o custo e uma taxa de rentabilidade financeira uniforme de 5%, ligeiramente superior à taxa de desconto considerada ($r = 3\%$), perfazendo 72,38€/m²/ano ou 723 835€/ha/ano. Note-se que a segunda abordagem contraria a tendência técnica atual de limitar ou proibir a expansão urbana em zonas de risco.

8.3.2. Resultados

Na Tabela 14 apresentam-se os valores atualizados de custos acumulados referentes ao cenário inicial (cenário 0), onde apenas foram modeladas as estruturas de defesa costeira existentes. Neste cenário foram consideradas as duas abordagens acerca da variação do valor territorial ao longo do tempo. Estes valores quantificam o valor representativo do território perdido pela erosão no trecho de 5km a sul do Furadouro, caso não haja qualquer intervenção e admitindo os parâmetros de entrada do LTC definidos na secção 7.3.2.

Tabela 14 – Valores atuais de custos acumulados do cenário de não haver qualquer prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro (cenário 0), por períodos de tempo de 10 anos [M€].

Ano	Abordagem 1	Abordagem 2
2015	0,00	0,00
2025	0,14	0,77
2035	0,24	2,24
2045	0,33	4,46
2055	0,41	6,74

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para os diversos cenários considerados para o prolongamento da obra longitudinal aderente. Na Figura 63 representam-se os rácios benefício-custo e os valores atuais líquidos ao longo do tempo. A escala dos eixos verticais foi ajustada de forma a permitir uma boa leitura das curvas, fazendo com que, no caso dos RBC, não seja representado o valor correspondente ao *break-even* ($RBC = 1$).

Tabela 15 – Valores da análise custo-benefício dos cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, para as duas abordagens de variação do valor territorial consideradas.

		Abordagem 1 (valor do terreno constante)				Abordagem 2 (valor do terreno variável)			
		VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]	VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]
Cenário 1	2015	4,00	0,00	-4,00	0,00	4,00	0,00	-4,00	0,00
	2025	5,71	0,02	-5,68	0,00	5,71	0,14	-5,57	0,02
	2035	6,98	0,04	-6,93	0,01	6,98	0,40	-6,57	0,06
	2045	7,92	0,05	-7,87	0,01	7,92	0,59	-7,33	0,07
	2055	8,62	0,06	-8,57	0,01	8,62	0,78	-7,84	0,09
Cenário 2	2015	8,00	0,00	-8,00	0,00	8,00	0,00	-8,00	0,00
	2025	11,41	0,06	-11,35	0,01	11,41	0,34	-11,07	0,03
	2035	13,95	0,11	-13,85	0,01	13,95	0,99	-12,96	0,07
	2045	15,84	0,13	-15,71	0,01	15,84	1,50	-14,34	0,09
	2055	17,25	0,14	-17,10	0,01	17,25	2,02	-15,23	0,12
Cenário 3	2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2025	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2035	2,21	0,00	-2,21	0,00	2,21	0,00	-2,21	0,00
	2045	3,16	0,00	-3,16	0,00	3,16	0,10	-3,06	0,03
	2055	3,86	0,01	-3,85	0,00	3,86	0,20	-3,67	0,05
Cenário 4	2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2025	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2035	4,43	0,00	-4,43	0,00	4,43	0,00	-4,43	0,00
	2045	6,32	0,01	-6,31	0,00	6,32	0,27	-6,05	0,04
	2055	7,72	0,02	-7,70	0,00	7,72	0,54	-7,18	0,07
Cenário 5	2015	4,00	0,00	-4,00	0,00	4,00	0,00	-4,00	0,00
	2025	5,71	0,02	-5,68	0,00	5,71	0,14	-5,57	0,02
	2035	9,19	0,04	-9,15	0,00	9,19	0,40	-8,79	0,04
	2045	11,08	0,05	-11,02	0,00	11,08	0,68	-10,40	0,06
	2055	12,49	0,06	-12,42	0,01	12,49	0,97	-11,51	0,08

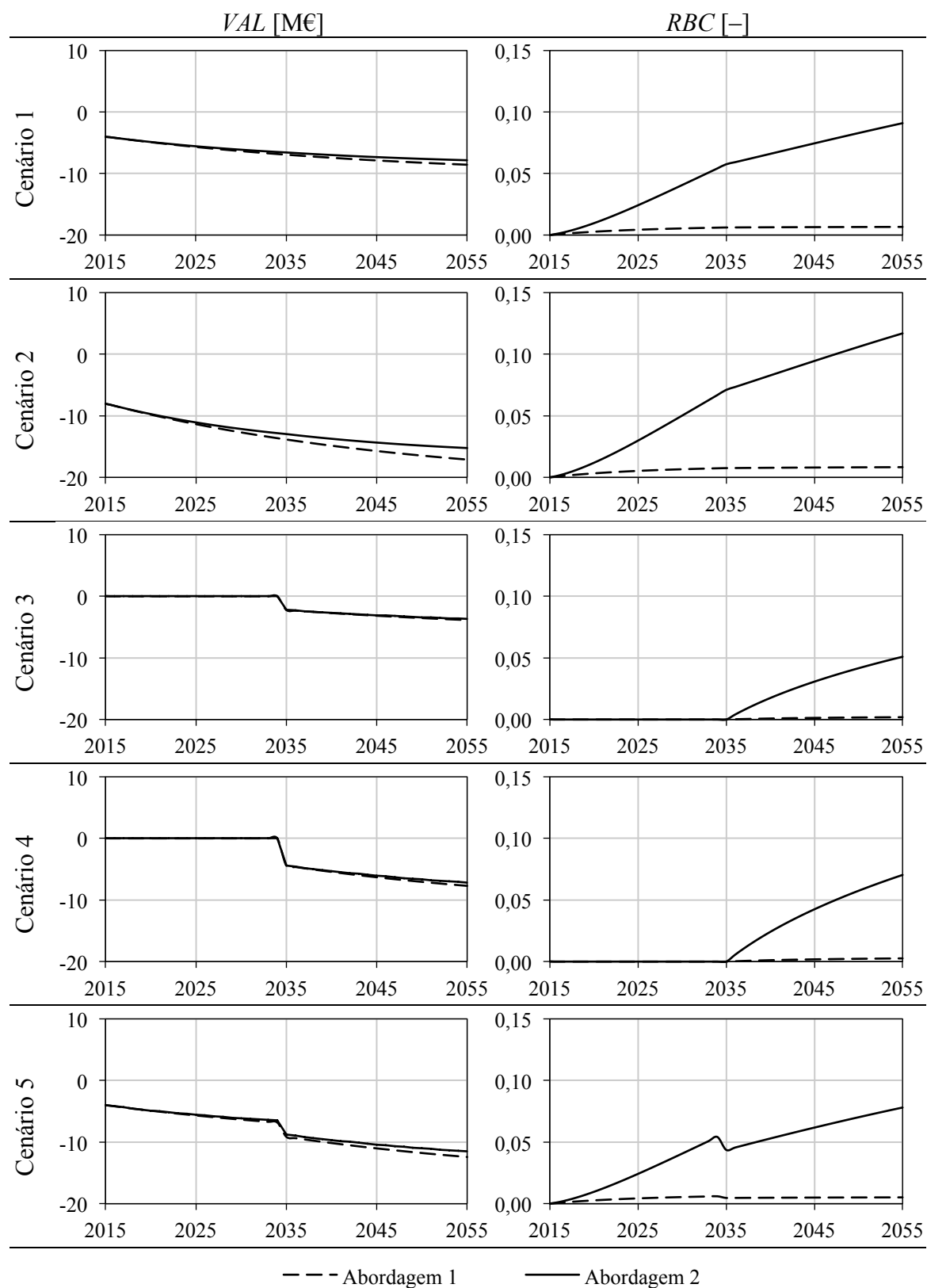


Figura 63 – Rácios benefício-custo e valores atuais líquidos dos cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, num prazo de 40 anos.

8.3.3. Análise crítica

No caso de não se proceder ao prolongamento ou construção de novas obras longitudinais aderentes no trecho de 5km a sul da praia do Furadouro, o total de áreas perdidas pode ascender aos 36,32ha ao fim de 40 anos, o que representa, no pior dos cenários considerados, um valor territorial na ordem dos 7 milhões de euros (Tabela 14, na abordagem 2). Focando os resultados da abordagem 1, caso a tipologia de utilização do solo no trecho em estudo, mais concretamente nas zonas litorais, se mantenha nos 20 000€/ha/ano, o baixo valor territorial associado às praias faz com que as perdas territoriais devido à erosão representem apenas cerca de 400 mil euros.

Em termos económicos verifica-se que, independentemente da abordagem considerada para a variação do valor do terreno ao longo do tempo, nenhum dos cenários de prolongamento da obra aderente sul do Furadouro apresenta viabilidade económica a curto ou a médio prazo. De facto, os valores atuais líquidos apresentam sempre valores negativos e, no melhor dos cenários, os rácios benefício-custo não ultrapassam os 12%. Isto deve-se principalmente ao facto do custo de construção deste tipo de estruturas ser bastante elevado relativamente ao valor das áreas que protegem e de não se estarem a considerar eventuais indemnizações por terrenos perdidos, caso haja necessidade de criar zonas tampão para proteger proprietários privados do recuo da linha de costa. Efetivamente, os cenários 1 e 3, onde se estudou o prolongamento da obra em 500m, apresentam investimentos iniciais de 4 milhões de euros com custos de manutenção anuais de 200 mil euros, valores estes que, mesmo num prazo de apenas 20 anos, ultrapassam o máximo valor territorial perdido no cenário inicial (7 milhões de euros).

Conforme seria espectável, a consideração de um maior valor unitário de área territorial faz com que os custos do cenário inicial aumentem e propicia uma diminuição ligeira dos valores atuais líquidos e um aumento dos rácios benefício-custo de todos os cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente. Isto resulta de uma valorização das áreas não perdidas, refletindo-se num aumento dos benefícios de cada cenário. No entanto, é possível afirmar que, embora a variação do valor territorial seja considerável entre as duas abordagens analisadas, não existem diferenças relevantes nas tendências económicas que daí resultam.

Analisando comparativamente os cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente, aqueles que apresentam resultados menos negativos são, por ordem decrescente

de valores atuais líquidos, os cenários 3, 4, 1, 5 e 2, ordem esta que coincide precisamente com a ordem crescente de áreas perdidas obtidas a partir os resultados da modelação da linha de costa (secção 7.3.3). Verifica-se que os cenários 2 e 5 são os que apresentam pior viabilidade económica, correspondendo também aos dois cenários onde a grandeza das áreas não perdidas foi maior. Apesar de, em termos de áreas não perdidas, a eficiência destas estruturas na fixação da linha de costa ser tanto maior, quanto mais extensa for a obra e mais antecipada for a sua construção, em termos de viabilidade económica da solução, passa-se precisamente o contrário. A construção de obras longitudinais aderentes com maiores comprimentos aumenta consideravelmente o custo de investimento inicial e não resulta necessariamente num aumento proporcional em termos de áreas não perdidas, ou seja, a relação entre benefícios e custos agrava-se. Conforme as conclusões tiradas dos resultados da modelação da posição da linha de costa, o impacto da construção ou prolongamento de obras longitudinais aderentes na dinâmica sedimentar global do sistema costeiro não é significativo e a fixação da linha de costa dá-se apenas no trecho onde estas estruturas estão construídas.

Por outro lado, os resultados dos cenários 3 e 4, onde o prolongamento da obra é realizado ao fim de 20 anos, podem induzir erros de interpretação dos valores atuais líquidos. Note-se que o facto do *VAL* ser nulo até 2035 não pressupõe que não haja um balanço positivo ou negativo em termos monetários, significa apenas que não há quaisquer custos ou benefícios em relação ao cenário de referência (cenário 0), ou seja, mantém-se todos os custos associados à perda de território.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo corresponde a um sumário de todo o trabalho desenvolvido, destacando as principais conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.

Nesta dissertação pretendeu-se fazer uma análise custo-benefício de obras longitudinais aderentes em dois âmbitos distintos: no estudo de alternativas de intervenção para reduzir galgamentos e na análise de cenários de prolongamento destas estruturas para fazer face ao problema da erosão. Para isso, desenvolveu-se uma metodologia de cálculo que permitiu estimar a frequência de galgamentos de obras aderentes a partir das suas principais características geométricas: profundidade de fundo à frente da obra e desnível entre a cota de coroamento e o nível médio do mar. O estudo do comportamento do perfil de praia permitiu obter uma expressão genérica que estima a profundidade máxima de erosão a partir da profundidade de fundo inicial e da altura de onda ao largo representativa. Desta forma, é possível estimar a evolução futura da frequência de galgamentos e antecipar os danos e custos associados. Aplicou-se esta metodologia ao caso de estudo do Furadouro, possibilitando uma análise custo-benefício de três soluções de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos.

Por outro lado, foi analisado o impacto da construção de obras longitudinais aderentes na configuração da linha de costa, a partir da modelação numérica da posição da linha de costa. Realizou-se uma análise de sensibilidade a vários parâmetros de entrada do modelo e estudaram-se vários cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, permitindo obter valores referentes a taxas de recuo médias, áreas perdidas e áreas não perdidas por efeito da intervenção. A viabilidade económica destas estruturas de defesa costeira no combate à erosão foi estudada a partir de uma análise custo-benefício dos cenários de prolongamento modelados, tendo em conta os custos de construção e manutenção das obras aderentes e o valor territorial das áreas perdidas e das áreas protegidas.

9.1. Conclusões

Obras longitudinais aderentes são estruturas artificiais de defesa costeira que conduzem a uma redução e dissipação da energia de ondulação. São normalmente utilizadas em zonas costeiras de grande vulnerabilidade e exposição à erosão e à ação marítima, cujos riscos de ocorrência de danos em edificações e infraestruturas são elevados. No entanto, este

tipo de estruturas acarretam custos avultados de construção, manutenção e reabilitação que muitas vezes são menosprezados e de difícil quantificação. A falta de monitorização e a capacidade energética da ondulação incidente nestas estruturas levam a situações recorrentes de roturas pontuais que comprometem a sua eficiência e estabilidade global. Assim, numa fase inicial, foram caracterizados todos os elementos constituintes da solução estrutural típica de obras longitudinais aderentes (fundação, núcleo, camadas constituintes, patamares intermédios, rampas de acesso, coroamento, geometria em plana e materiais constituintes) e identificados os principais impactes e causas de instabilidade estrutural (erosão no perfil de praia, subescavações, galgamentos, escoamentos no tardo, assentamentos e erosão a sotamar).

A primeira dificuldade desta dissertação relacionou-se com a contabilização de custos associados aos fenómenos de instabilidade estrutural (intervenções de manutenção e reabilitação tais como o rearranjo de blocos, a construção de banquetas de fundação, o reforço de patamares e de coroamentos, o aumento do peso dos blocos, a betonagem de juntas, etc.) e aos impactes dos galgamentos nas zonas urbanas adjacentes às obras longitudinais aderentes (danos no edificado e em bens privados, reparações de infraestruturas, limpeza da via pública, etc.). No caso da praia do Furadouro, a análise criteriosa da descrição dos registos de intervenções, compilados na base de dados elaborada, permitiu estabelecer custos médios de referência para a reabilitação de obras aderentes (cerca de 500€/m/ano) e para a limpeza da via pública e a reparação de infraestruturas (cerca de 30 000€/ano).

A variação destes encargos ao longo do tempo está diretamente associada ao grau de exposição da frente urbana protegida, dependendo ainda de um conjunto alargado de fatores, sendo os mais importantes o clima de agitação marítima e o comportamento e morfologia das praias. A forma adotada para antecipar a evolução destes encargos ao longo do tempo passou por estimar a frequência de galgamentos das obras aderentes. Para isso, partiu-se de um conjunto alargado de registos de onda ao largo e quantificaram-se todas as ondas que provocassem galgamento da estrutura, ou seja, cuja cota de espraçamento fosse superior à cota de coroamento. Verificaram-se desde logo incertezas relacionadas com caracterização da agitação marítima incidente nas estruturas, nomeadamente na simulação dos fenómenos de propagação de ondas. Os fenómenos de empolamento e refração, avaliados no decorrer do trabalho, foram estimados com base em teorias simplificadas (teoria linear de ondas de *Airy*, lei de *Snell*, etc.) onde foram

assumidas várias simplificações de cálculo, podendo estas não representar o comportamento real das ondas na medida em que, por exemplo, foi desprezada a variação de período de onda no fenómeno de refração, considerou-se uma relação linear entre os períodos e as alturas de onda significativas ao largo e foi necessário assumir uma batimetria regular aquando da aplicação da lei de *Snell*. Em acréscimo, também se verificam incertezas relacionadas com o estudo do espraçamento das ondas, na medidas em que a avaliação do limite de espraçamento não segue um processo de cálculo consensual. Partiu-se do estudo de Teixeira (2014) e considerou-se uma formulação empírica simplificada aplicável a estruturas costeiras com mantos resistentes inclinados, baseada em diversas propostas de cálculo existentes na literatura. No entanto, importa notar que a simples avaliação do espraçamento de ondas pode ter consequências diretas nos resultados das frequências de galgamentos.

Como seria espectável, verificou-se que a frequência de galgamentos é tanto maior, quando maior é a profundidade de fundo à frente da obra aderente e quando menor é o desnível existente entre a cota de coroamento da estrutura e o nível médio do mar. É necessário ter em conta que a dispersão de resultados traduz-se num desvio padrão na ordem dos 5% associado às curvas médias obtidas para a frequência de galgamentos. No caso do Furadouro estimou-se uma percentagem atual de dias com galgamentos de cerca de 8,8%, valor este que se aproxima do número de registos efetivamente observados nos últimos 2 anos. O impacto dos galgamentos com esta frequência na zona urbana do Furadouro foi estimado em cerca de 210 000€/ano, referentes a danos no edificado e perdas de bens materiais privados nas zonas inundadas.

O estudo do comportamento típico do perfil de praia em situação de défice sedimentar baseou-se na análise exaustiva de diversas formulações de forma a estimar a profundidade máxima de erosão. Obteve-se uma expressão teórica que conjuga e resume as expressões analisadas e permite quantificar o abaixamento máximo do perfil de praia dependendo da profundidade de fundo inicial à frente da obra e da altura de onda significativa ao largo. Esta expressão baseia-se unicamente na análise de resultados das diversas formulações consideradas, não tendo sido feito qualquer ensaio laboratorial ou comprovação com casos de estudo reais. Nesse sentido, os resultados médios obtidos para a profundidade máxima de erosão a longo prazo têm apenas fundamentação teórica e devem ser usados com cautela tendo em conta a dispersão de valores e a variabilidade em função da altura de onda ao largo representativa da zona de estudo. A estimativa do abaixamento máximo

do perfil de praia deve ser feita a partir da gama de valores dada pela profundidade máxima de erosão relativa ($S_{m\acute{a}x}/H_0$), de forma a permitir quantificar a incerteza associada à altura de onda ao largo representativa. Em relação ao caso de estudo, na praia do Furadouro antecipou-se um abaixamento máximo do perfil de praia de cerca de 1,35m a longo prazo, partindo duma análise estatística das profundidades máximas de erosão obtidas para todos os registos de ondulação existentes. Este abaixamento perfaz um agravamento final de 35% da frequência de galgamentos anual, caso não haja nenhuma intervenção.

Com o objetivo de corroborar a hipótese de existir uma tendência de agravamento dos parâmetros de onda ao longo do tempo, complementarmente ao abaixamento do perfil de praia, foram analisadas as alturas de onda significativas e a direção de propagação de todos os registos de onda da boia ondógrafo de Leixões. De facto, verificou-se que, em termos médios, nem as direções da ondulação, nem as alturas de onda ao largo apresentam variações significativas ao longo do tempo que justifiquem o aumento da frequência de registos de dano no litoral de Ovar. Conclui-se que o crescente grau de exposição e vulnerabilidade destas zonas costeiras deve-se principalmente ao défice sedimentar generalizado e à erosão costeira.

A análise de três propostas de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos de obras longitudinais aderentes (aumento da cota de coroamento, alimentação artificial do perfil de praia e construção de um patamar intermédio) permitiu obter estimativas para a eficiência e o custo de cada intervenção aplicada ao caso da obra longitudinal aderente central do Furadouro (600€/m, 4371€/m e 818€/m, respetivamente). No entanto, importa ter em conta que estas estimativas de custo foram avaliadas de forma simplificada, a partir do volume e dos custo unitários dos materiais necessários à intervenção.

A contabilização dos diversos custos inerentes a cada tipologia de intervenção ao longo do tempo, bem como dos benefícios associados à redução da frequência de galgamentos e de danos consequentes, permitiu fazer uma análise custo-benefício de forma a avaliar a viabilidade económica das três soluções analisadas. Verificou-se que, caso não se realize qualquer tipo de intervenção para reduzir os galgamentos no Furadouro, o total de custos acumulados pode ascender, no pior dos cenários, a quase 30M€ num prazo de 40 anos. Em termos económicos, os cenários mais favoráveis foram o aumento da cota de coroamento (*VAL* entre 7,2M€ e 11,1M€ a 40 anos) e a construção do patamar intermédio (*VAL* entre 5,2M€ e 8,3M€ a 40 anos), devido essencialmente à sua boa eficiência na

redução de galgamentos face ao baixo custo de intervenção. A alimentação artificial do perfil de praia é a intervenção com resultados menos favoráveis, atingindo no melhor dos cenários, *VAL* entre 1,9M€ e 3,6M€ a 40 anos.

No entanto, é importante referir que não foram tidos em conta os efeitos positivos da manutenção do areal das praias e da eventual mitigação dos efeitos de erosão nas zonas a sotamar da área de alimentação artificial de sedimentos, nem foi analisada a hipótese de periodicidade de alimentações artificiais com menor volume de sedimentos. Esta ressalva, juntamente com o facto da análise custo-benefício se basear num conjunto de premissas e metodologias que apresentam incertezas quer na contabilização de custos, quer na estima de evolução dos diferentes encargos ao longo do tempo, poderão ter influência nos resultados obtidos e devem ser tidos em conta aquando da sua análise.

Por último, realizou-se a modelação numérica da configuração da linha de costa para diferentes cenários de prolongamento da obra longitudinal aderente sul do Furadouro, permitindo aferir que o impacto da construção deste tipo de estruturas na dinâmica sedimentar das zonas a sotamar é desprezável e que a sua eficiência na fixação da linha de costa é tanto maior, quando mais extenso foi o trecho protegido e quanto mais antecipada no tempo for a construção da obra. Caso não se proceda a nenhuma intervenção de defesa costeira no trecho analisado ao fim de 40 anos, estima-se que as áreas perdidas por erosão possam ultrapassar os 35ha. No entanto, do ponto de vista económico, concluiu-se que, independentemente do valor territorial considerado, nenhum dos cenários apresenta viabilidade económica a curto ou a médio prazo. Isto deve-se ao facto do custo de construção das obras longitudinais aderentes ser bastante elevado relativamente ao valor das áreas protegidas. No entanto, não foi feita uma análise de sensibilidades ao custo de construção e de manutenção das obras aderentes. Por outro lado, importa referir que esta análise custo-benefício se baseia nos resultados da modelação numérica dos cenários de prolongamento da obra, bastante sensíveis à variabilidade dos parâmetros de entrada do modelo e às imprecisões do levantamento altimétrico.

9.2. Desenvolvimentos futuros

Devido à diversidade de áreas de estudo abordadas nesta dissertação e à geral complexidade dos fenómenos envolvidos, são muitas as fontes de incerteza. Assim, considera-se que há ainda muito a explorar neste âmbito de estudo.

A incerteza associado às simplificações usadas em teorias de ondas deve ser mitigado através da simulação de fenómenos de propagação de ondas e do cálculo de alturas de onda com recurso a modelos numéricos. Desta forma, ter-se-iam em conta os dados batimétricos reais de determinada zona de estudo no cálculo das características das ondas locais, aumentando a representatividade do clima de agitação marítima local obtido. Apesar de não ser âmbito deste trabalho, verificou-se também que as cartas hidrográficas e as cartas militares estão bastante desatualizadas, podendo não ser representativos da altimetria atual de diversos trechos do litoral, nomeadamente do concelho de Ovar. É essencial proceder a novos levantamentos batimétricos e topográficos das zonas costeiras.

A avaliação do limite de espraçamento das ondas é bastante complexa. A variedade de formulações existentes comprova a incerteza no estudo deste fenómeno. Especificamente para obras longitudinais aderentes, urge analisar a influência da declividade das ondas, da construção de patamares intermédios e da inclinação do fundo no espraçamento das ondas. Este campo deverá ser alvo de estudo detalhado em modelos físicos à escala ou em modelos numéricos através da simulação da interação das ondas com os blocos do manto resistente.

Também o fenómeno de galgamento de estruturas aderentes à costa deve ser alvo de um estudo mais detalhado. A análise da frequência de galgamento, bem como do caudal galgado deverá possibilitar a antecipação do risco das zonas marginais e a contabilização dos danos consequentes dos galgamentos. Os impactes de inundações nas zonas urbanas devem ser identificados e detalhados, relacionando os encargos associados a danos em edifícios e a perdas de bens privados com a frequência de galgamentos e com os caudais galgados.

O estudo do comportamento do perfil de praia à frente de obras longitudinais aderentes é intrínseco à caracterização da ondulação incidente, pelo que é essencial para antecipar a evolução futura da frequência de galgamentos e da gravidade dos danos associados. No entanto, a avaliação da profundidade máxima de erosão é bastante complexa, por todos os fatores e processos envolvidos. A variedade de formulações existentes e a disparidade entre comportamentos das diversas metodologias, comprova a incerteza associada à estimativa do abaixamento do perfil de praia. O estudo realizado nesta dissertação depende destas incertezas, pelo que é fundamental complementar essa análise com a realização de ensaios laboratoriais e através da monitorização das zonas emersas e imersas de perfis de praia em zonas onde existem obras longitudinais aderentes. A

obtenção destes dados poderia também ser útil no estudo do tempo de estabilização dos perfis de praia, permitindo determinar taxas de abaixamento do perfil de praia e estudar a variação da frequência de galgamentos ao longo do tempo, em função do clima de agitação marítima, da dinâmica sedimentar da zona costeira e da morfologia da praia.

A incerteza relacionada com os custos de intervenção estimados deve ser mitigada através da orçamentação direta de cada tipologia de intervenção. A análise do cenário de alimentação artificial do perfil de praia deve ter em conta os impactes positivos na mitigação dos efeitos de erosão a sotamar. A contabilização dos benefícios desta intervenção deve incluir os efeitos positivos da manutenção do areal das praia, quer em termos de valor recreativo, quer em termos de incentivo turístico, comercial e habitacional das zonas urbanas. Para além dos cenários de intervenção para reduzir galgamentos analisados nesta dissertação, devem também ser estudadas eventuais periodicidades de intervenção. A eficiência e viabilidade económica do cenário de alimentação artificial da praia deve ser alvo de uma análise mais detalhada, assumindo intervenções periódicas com menor volume de sedimentos.

Complementarmente, deverá ser feita uma análise de sensibilidade aos custos usados nas análises custo-benefício, bem como aos parâmetros financeiros considerados, nomeadamente, à taxa de desconto e à taxa de rentabilidade financeira territorial.

Em relação à previsão do comportamento da configuração da linha de costa ao longo do tempo, o caudal sólido disponível é um dos fatores mais determinantes. Assim, é fulcral verificar a adequabilidade das expressões de estimativa do transporte sólido longitudinal (CERC, 1984 e Kamphuis *et al.*, 1986). No seguimento do que foi referido anteriormente, também o acesso a dados batimétricos e topográficos mais atualizados permitiria uma maior representatividade das linhas de costa obtidas por modelação numérica.

Em suma, apesar do volume de incerteza associado à grande complexidade da agitação marítima e dos fenómenos envolvidos na dinâmica sedimentar das zonas costeiras, este trabalho pretende contribuir para o estudo dos impactes das obras longitudinais aderentes e para a discussão acerca da eficiência dessas estruturas como solução possível de combate à erosão costeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P.; (2011); “Análise económico-ambiental de alimentação artificial de praias”; tese de mestrado; Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.
- Alves, F.; Roebeling, P.; Pinto, P.; Batista, P.; (2009); “Valuing ecosystem service losses from coastal erosion along the central Portuguese coast: a benefits transfer approach”; *Journal of Coastal Research*, 56; pp. 1169–1173.
- APA; (2014); “Proteção do litoral: intervenções concluídas e em execução”; Relatório de atividades da Agência Portuguesa do Ambiente atualizado a 13 de Outubro de 2014; URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/IntervencoesConcluidasExecucao_v7.1.pdf (último acesso em fevereiro de 2015).
- ARHC; (2009); “Relatório sobre as actividades desenvolvidas no âmbito da Ria de Aveiro, 2009”; Relatório de atividades da Administração da Região Hidrográfica do Centro referentes ao ano 2009. URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/Instrumentos_de_Gestao/ARH_Centro/ARHC_Relatorio_Atividades_2009_Ria.pdf (último acesso em fevereiro de 2015).
- ARHC; (2010); “Relatório sobre as actividades desenvolvidas no âmbito da Ria de Aveiro, 2010”; Relatório de atividades da Administração da Região Hidrográfica do Centro referentes ao ano 2010. URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/Instrumentos_de_Gestao/ARH_Centro/ARHC_Relatorio_Atividades_2010_Ria.pdf (último acesso em fevereiro de 2015).
- ARHC; (2011); “Relatório sobre as actividades desenvolvidas no âmbito da Ria de Aveiro, 2011”; Relatório de atividades da Administração da Região Hidrográfica do Centro referentes ao ano 2011. URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/instrumentos_de_gestao/arh_centro/arhc_relatorio_atividades_2011_ria.pdf (último acesso em fevereiro de 2015).
- Barnett, M.; (1987); “Laboratory study of the effects of a vertical seawall on beach profile response”; Report 87/005; Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida; Gainesville, Finland.
- Birkemeier, W.; (1985); “Field data on seaward limit of profile change”; *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 111(3); pp. 596–602.
- Bodge, K.; Kraus, N.; (1991); “Critical examination of longshore transport rate magnitude”; *Proceedings of Conference on Coastal Sediments '91*; pp. 139–155; ASCE-American Society of Civil Engineers; Seattle, Washington, D.C.
- Bruun, P.; (1954); “Coastal erosion and development of beach profiles”; Technical Memorandum n.º 44; Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C. (Citado por Coelho, 2005).

- Burcharth, H.; Hughes, S.; (2011a); “Fundamentals of design”; Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 5; U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C.
- Burcharth, H.; Hughes, S.; (2011b); “Types and functions of coastal structures”; Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 2; U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C.
- Carpinteiro, F.; (2009); “Transposição artificial de areias na Barra de Aveiro”; tese de mestrado; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- CEHIDRO; (2010); “Exigência do elemento prévio número 1 da DIA do projecto de reconfiguração da barra do Porto de Aveiro”; Administração do Porto de Aveiro (citado em Pereira e Coelho, 2011).
- CERC; (1984); “Shore Protection Manual”; U.S. Army Corps of Engineers; Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station; Washington, D.C. (citado por van Rijn, 2013).
- Chesnutt, C.; Schiller, R.; (1971); “Scour of simulated gulf coast sand beaches due to wave action in front of sea walls and dune barriers”; COE Report n.º139; TAMU-SG-71-207; Texas A&M University, College Station; Texas.
- CIRIA; CUR; CETMEF; (2007a); “Design of marine structures”; The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), Chapter 6; CIRIA; London.
- CIRIA; CUR; CETMEF; (2007b); “Physical processes and design tools”; The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), Chapter 5; CIRIA; London (citado em Lima, 2011).
- Coelho, C.; (2005); “Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira”; tese de doutoramento; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Coelho, C.; Conceição, T.; Ribeiro, B.; (2009); “Coastal erosion due to anthropogenic impacts on sediment transport in Douro river, Portugal”; Proceedings of coastal dynamics, impacts of human activities on dynamic coastal processes; World Scientific; ISBN: 978-981-4282-46-8.
- Coelho, C.; Pereira, C.; Costa, S.; Lima, M.; (2014); “A erosão costeira, as tempestades e as intervenções de defesa costeira no litoral do concelho de Ovar, Portugal”; CESAM e Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (em edição).
- Coelho, C.; Veloso-Gomes, F.; (2003); “Wave climate and longshore sediment transport in the northwest Portuguese coast”; Proceeding of the third IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2003; pp. 1037–1048; Sánchez-Arcilla, A. Bateman, A.; Barcelona, Espanha.

- Costa, S.; Coelho, C.; (2013); “Northwest coast of Portugal - past behavior and future coastal defense options”; *Journal of Coastal Research*, 1(65); pp. 921–926; doi:10.2112/SI65-156.
- Cowell, P.; Hanslow, D.; Meleo, H.; (1999); “The Shoreface”; *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*; pp. 39–71; Short, Andrew D.; University of Sydney; Sydney, Australia.
- Cruz, T.; Pereira, C.; Coelho, C.; Roebeling, P.; (2015); “Desempenho de obras longitudinais aderentes no concelho de Ovar, Portugal”; VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa; APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos; Aveiro, Portugal.
- Davis, S.; Skaggs, L.; (1992); “Catalog of residential depth-damage functions - used by the Army Corps of Engineers in flood damage estimation”; *Institute for Water Resourcer, US Army Corps of Engineers; Fort Belvoir, USA (Citado em Roebeling et al., 2015).*
- de Groot, R.; Brander, L.; van der Ploeg, S.; Costanza, R.; Bernard, F.; Braat, L.; Christie, M.; Crossman, N.; Ghermandi, A.; Hein, L.; Hussain, S.; Kumar, P.; McVittie, A.; Portela, R.; Rodriguez, L. C.; ten Brink, P.; van Beukering, P.; (2012); “Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units”; *Ecosystem Services*, 1(1); pp. 50–61; doi:10.1016/j.ecoser.2012.07.005.
- Dean, R. G.; (1977); “Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts”; *Ocean Engineering Report n.º 12*; Department of Civil Engineering; University of Delaware; Newark, USA.
- DGT; (2007); “COS2007 - Carta de uso e ocupação do solo de Portugal continental”; Instituto Geográfico Português; Lisboa, Portugal; URL: http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/carta_de_ocupacao_do_solo__cos_/cos__2007/ (último acesso em Fevereiro de 2015).
- DGT; (2013); “Áreas das freguesias, municípios, distritos e ilhas da carta administrativa oficial de Portugal (CAOP)”; Instituto Geográfico Português; Lisboa, Portugal; URL: http://www.dgterritorio.pt/ficheiros/cadastr/cap/caop_download/caop_2013_0/areasfregmundistcaop2013_2 (último acesso em Outubro de 2014).
- EUrosion; (2006); “EUrosion - a european initiative for sustainable coastal erosion management”; Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Porto, Portugal; ISBN: 972-752-074-x.
- Eurotop; (2007); “Wave overtopping of sea defences and related structures-assessment manual”; UK: Allsop N.; Pullen T.; Bruce T.; NL: van der Meer; DE: Schuttrumpf, H.; Kortenhaus A.

- Fidelidade; (2015); “Fidelidade Casa”; Simulação de plano base de apartamento T2; Lisboa, Portugal; URL: <http://www.fidelidade.pt/pt/familias/protecao-bens/casa/Pages/DetalhePrecoConteudoBase.aspx> (último acesso em Setembro de 2015).
- Fleming, C.; Allsop, N.; Leeming, M.; Sharp, B.; Slater, D.; Williams, A.; Titman, P.; (1998); “Concrete in coastal structures”; Thomas Telford; London; ISBN: 0 7277 2610 2.
- Fontão, F.; (2008); “Intervenções de defesa em zonas costeiras”; Projeto de final de mestrado em Engenharia Mecânica; Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Fowler, J.; (1992); “Scour problems and methods for prediction of maximum scour at vertical seawalls”; Technical report n.º CERC-92-16; U.S. Army Corps of Engineers; Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station; Vicksburg, Mississippi.
- Fredsøe, J.; Sumer, B.; (1997); “Scour at the round head of a rubble-mound breakwater”; Coastal Engineering, 29(3); pp. 231–262; Elsevier.
- Goda, Y.; (1974); “New wave pressure formulae for composite breakwater”; Proceedings of 14th International Conference on Coastal Engineering; pp. 1702–1720; ASCE-American Society of Civil Engineers; Copenhagen, Denmark.
- Grune, J.; Wang, Z.; (2000); “Wave run-up on sloping seadykes and revetments”; Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2000); pp. 2044–2057; Sidney, Australia; doi: [http://dx.doi.org/10.1061/40549\(276\)160](http://dx.doi.org/10.1061/40549(276)160).
- GTL; (2014); “Gestão da zona costeira - o desafio da mudança”; Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral; URL: http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2015/GTL_Relatorio_Final_20150416.pdf (último acesso em Novembro de 2015).
- Hallermeier, R.; (1978); “Uses for a calculated limit depth to beach erosion”; Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference; pp. 1493–1512; ASCE-American Society of Civil Engineers; Hamburg, Germany.
- Hallermeier, R.; (1981); “Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains”; Sedimentology, 28(6); pp. 859–865; doi: 10.1111/j.1365-3091.1981.tb01948.x.
- Herbich, J.; Ko, S.; (1968); “Scour of sand beaches in front of seawalls”; Proceedings of 11th Conference on Coastal Engineering; pp. 622–643; ASCE-American Society of Civil Engineers; London; ISBN: 978-0-87262-013-1.
- Hughes, S.; (2006); “Materials and construction aspects;” Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 5; U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C.

- Hughes, S.; Fowler, J.; (1991); “Wave-induced scour prediction at vertical walls”; Proceedings of Conference on Coastal Sediments '91; pp. 1886–1900; ASCE-American Society of Civil Engineers; Seattle, Washington, D.C.
- IH; (2014); “Boias ondógrafo - Instituto Hidrográfico”; Informação acerca da rede de boias ondógrafo em Portugal; URL: <http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php> (último acesso em Novembro de 2014).
- IHRH/FEUP; (2010); “Programa de observação e de manutenção das estruturas de defesa costeira de frentes edificadas em risco”; Estudo de vulnerabilidades e riscos às ações diretas e indiretas do mar sobre a zona costeira (primeira fase), Volume 2; Instituto de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, com a Sociedade Polis Litoral Norte, SA.
- INAG; (2009); “Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira”; Diário da República, 1ª série, n.º 174, 8 de Setembro de 2009; Resolução do Conselho de Ministros n.º 82/2009.
- INE; (2012); “Censos 2011: Quadros de apuramento por freguesia”; URL: <http://www.ine.pt/investigadores/Quadros/Q101.zip> (último acesso em Outubro de 2014).
- Jones, D.; (1975); “The effect of vertical seawalls on longshore currents”; PhD dissertation; University of Florida, USA.
- Kamphuis, J.; Davies, M.; Nairn, R.; Sayao, O.; (1986); “Calculation of littoral sand transport rate”; Coastal Engineering, 10(1); doi: 10.1016/0378-3839(86)90036-0.
- Kraus, N.; Larson, M.; Randall, A.; (1998); “Depth of closure in beach-fill design”; U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory (Citado por Coelho, 2005).
- Lamy, A. (2001); “Monografia de Ovar – Freguesia de São Cristóvão e de São João de Ovar”; 2ª Edição; Câmara Municipal de Ovar.
- Lima, M.; (2011); “Programação de métodos de pré-dimensionamento de obras costeiras”; tese de mestrado; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- LNEC; (1996); “Instalação de uma monobóia para descarga de petróleo bruto para a refinaria do porto, caracterização das condições naturais”; Relatório 172/96 – NPP, Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Confidencial (citado em Coelho, 2005).
- Marinho, B.; (2013); “Procedimentos no estudo de obras de defesa costeira”; tese de mestrado; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- McCowan; (1891); “On the solitary wave”; Philosophical Magazine; 5th Series; Vol. 36, pp. 430–437.

- McDougal, W.; Kraus, N.; Ajiwibowo, H.; (1996); “The effects of seawalls on the beach: Part 2, Numerical modelling of supertank seawall tests”; *Journal of Coastal Research*, 12(3); pp. 702–713.
- Morang, A.; Parson, L.; (2002); “Coastal morphodynamics”; *Coastal Engineering Manual*, Part IV, Chapter 3; Washington, D.C. (Citado por Coelho, 2005).
- O’Donoghue, T.; (2001); “N-type sediment bed response under standing wave”; *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127(4); pp. 245–248; doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:4(245).
- Oliveri, E.; Santoro, M.; (2000); “Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo”; *Urban Water*, 2(3); pp. 223–234; doi: 10.1016/S1462-0758(00)00062-5.
- Pereira, C.; Coelho, C.; (2011); “Base de dados da ação marítima sobre o litoral: trechos Esmoriz-Furadouro e Vagueira-Mira”; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (não publicado).
- Pereira, C.; Coelho, C.; (2013); “Mapas de risco das zonas costeiras por efeito da ação energética do mar”; *Journal of Integrated Coastal Zone Managment*, 13(1); pp. 27–43; doi: 10.5894/rgci325.
- Powell, K.; (1987); “Toe scour at sea wall subject to wave action - a literature review”; Hydraulic Research Limited; Wallingford, United Kingdom.
- Powell, K.; Lowe, J.; (1994); “The scouring of sediments at the toe of seawalls”; *Proceedings of the Hornafjordur International Coastal Symposium*; pp. 749–755; Viggosson, Gisli; Iceland.
- Powell, K.; Whitehouse, R.; (1998); “The occurrence and prediction of scour at coastal and estuarine structures”; 33rd MAFF Conference of River and Coastal Engineers; Keele University; UK.
- Reis, E.; (2010); “Evolução da linha de costa e defesa das zonas costeiras - análise custo/benefício”; tese de mestrado; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Rijn, L.; (1984); “Sediment transport: Part I – Bed load transport, Part II – Suspended load transport, Part III – Bed forms and alluvial roughness”; *Journal of Hydraulic Engineering*, 110; pp. 1431–1456, 1613–1641, 1733–1754.
- Roebeling, P.; Rocha, J.; Coelho, C.; Alves, F.; Vizinho, A.; (2015); “Cost-benefit analysis of coastal erosion adaptation pathways along the Barra-Vagueira coastal stretch”; Report prepared in the context of the project BASE (Bottom-Up Climate Adaptation Strategies for Europe); Department of Environment and Planning, University of Aveiro.

- Roebeling, P.; Rocha, J.; Alves, H.; Rodríguez-Blanco, M.; Fonseca, S.; (2012); “Assessing the cost-effectiveness of reduced N-fertilizer application rates and alternatives application regimes in the Cértima catchment”; Proceedings of the 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop; Bari, Italy; doi: 10.13031/2013.41448.
- Rosati, J.; Walton, T.; Bodge, K.; (2002); “Longshore sediment transport”; Coastal Engineering Manual, Part III, Chapter 2; U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C.
- Schoonees, J. S.; Theron, A. K.; (1993); “Review of the field-data base for longshore sediment transport;” Coastal Engineering, 19(1-2); doi:10.1016/0378-3839(93)90017-3.
- Silva, P.; (2012); “A tendência da linha de costa entre as praias de Maceda e S. Jacinto”; tese de mestrado; Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.
- Song, W.; Schiller, R.; (1973); “Experimental studies on beach scour due to wave action”; Report n.º 166 C.O.E.; Coastal, Hydraulic and Ocean Engineering Group; Texas A&M University; TAMU-SG-73-211.
- Soulsby, R.; (1997); “Dynamics of marine sands: a manual for practical applications”; Dynamics of Marine Sands: a Manual for Practical Applications; Thomas Telford; ISBN: 978-0-7277-2584-X.
- Sumer, B. .; Fredsøe, J.; (2000); “Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater”; Coastal Engineering, 40(1); pp. 59–87; doi: 10.1016/S0378-3839(00)00006-5.
- Sutherland, J.; Brampton, A.; Motyka, G.; Blanco, B.; Whitehouse, R.; (2005); “Beach lowering in front of coastal structures: research scoping study”; DEFRA-Department for Environment, Food and Rural Affairs; EA-Environment Agency; ISBN: 0-85521-163-6.
- Taveira-Pinto, F.; (2001); “Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebra-mares submersos sob a acção da agitação marítima”; tese de doutoramento; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Teixeira, N.; (2014); “Estudo do limite de espreamento das ondas”; tese de mestrado; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Tucker, M.; (1991); “Waves in ocean engineering measurement, analysis, interpretation”; E. Horwood; New York; New York.
- Valente, F.; (2015); “Estudo do impacte da erosão costeira na frente marítima de Ovar”; relatório de estágio; Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

- Veloso-Gomes, F.; (2010); “Contributos para a revisão do plano de ordenamento da orla costeira na região centro”; Quintas Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; ISBN: 978-989-95557-4-7.
- Waal, J.; van der Meer, J.; (1992); “Wave run-up and overtopping on coastal structures”; Proceedings of the 23th International Coastal Engineering Conference; pp. 1758–1771; ASCE-American Society of Civil Engineers; Venice, Italy.
- Xie, S.; (1981); “Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influences on the stability of the foundation of the breakwaters”; master thesis; Department of Civil Engineering; Delft University of Technology.
- Xie, S.; (1985); “Scouring patterns in front of vertical breakwaters”; Acta Oceanologica Sinica, 4(1); pp. 153–164.
- Zerbe, R.; Dively, D.; (1994); “Benefit-cost analysis in theory and practice”; HarperCollins College Publishers; New York, USA; ISBN: 9780673180667.

ANEXOS

ANEXO A – BASE DE DADOS DE EVENTOS DE DANO

A Tabela 16 apresenta a base de dados compilada de eventos de dano devidos à ação marítima nas praias do concelho de Ovar. Conforme descrito na secção 5.5.1, distinguem-se cinco tipologias de ocorrência: recuo da linha de costa (RLC); galgamentos (GAL); destruição do cordão dunar (DCD); danos em infraestruturas (DI); e danos em obras de defesa costeira (DDC).

Tabela 16 – Ocorrências e eventos de dano consequentes da ação marítima, registados nas praias do concelho de Ovar desde 1857 até 2015.

Data			Local	Ocorrências	Descrição	Referências
Ano	Mês	Dia				
1857	Jan	13	Furadouro	DI	Destruição de 15 palheiros na área piscatória e deslocação de areias.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1863	Dez		Furadouro	DI	Destruição de 32 palheiros.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1887	Mar		Furadouro	DI	Destruição de 18 palheiros.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1889	Mar		Furadouro	DI	Destruição de 2 palheiros.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1912	Fev	2	Furadouro	RLC; GAL; DI	Forte temporal com ondas de grandes dimensões. Avanço de cerca de 200m entre a capela velha do Senhor da Piedade e o sítio denominado de Boldim. Destruição de 18 palheiros. Formação de uma espécie de baía bastante extensa.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1938	Dez		Furadouro	DI	Destruição parcial da capela do Senhor da Piedade.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1939	Fev		Furadouro	DI	Derrube completo da capela do Senhor da Piedade.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1940	Fev		Furadouro	DI	Derrube de casas na avenida central. Derrube de uma casa de um andar entre a Capela do Senhor da Piedade e o começo da Avenida Central.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1950			Furadouro	RLC	Grande erosão na praia.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1950	Nov		Furadouro	GAL	Avanço do mar até cerca de 5m da capela nova.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1957	Dez	11	Furadouro	GAL	Demolição da Capela Nova da Senhora da Piedade, após destruição dos alicerces devido à ação do mar.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)

1958	Ago		Furadouro	GAL; DI	O mar destrói 150m de esplanada a partir da avenida central, provocando um corte profundo na avenida marginal. Estragos a sul da praia e destruição de um palheiro.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1965	Jan		Furadouro	DI	Derrube do palheiro da família Pinto Palavra e do <i>chalet</i> da família Matos, localizado muito a sul.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1969	Jan		Furadouro	DI	Destruição de 2 palheiros.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1969	Out		Furadouro	RLC; GAL; DI	Enormes prejuízos causados pelos avanços do mar. Destruição de 80m do muro da Avenida Infante D. Henrique e desaparecimento de grandes quantidades de areia.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015)
1969	Nov	13	Furadouro	GAL; DI	O mar entra na avenida central e a sul da praia, atingindo 2 palheiros.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1969	Dez		Furadouro	DI	Desalojamento de 15 famílias (57 pessoas)	Valente (2015)
1971	Jan	24	Furadouro	RLC; GAL; DI; DDC	Grande destruição e avanço do mar. O esporão situado em frente ao hotel cedeu parcialmente, ficando desmantelado em dois sítios. Galgamentos com inundação da marginal e da Avenida Central da praia.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); CMOS
1981	Dez		Furadouro	GAL	Mar atinge a avenida marginal.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1984	Mar		Furadouro	GAL	Mar atinge a avenida marginal.	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
1994	Jan		Cortegaça	RLC; GAL	Forte temporal, com entrada do mar junto ao parque de campismo.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1994	Jan		Maceda	DDC	Forte temporal, com destruição de um esporão.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1994	Jan		Furadouro	DDC	Forte temporal, causando a destruição de um esporão e o rombo na obra longitudinal aderente do parque de estacionamento.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1995	Fev		Cortegaça	GAL; DCD; DDC	Galgamentos e destruição da plataforma litoral, dos esporões e erosão dunar.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1996	Jan		Esmoriz	GAL; DCD; DDC	Destruição do cordão dunar e de habitações do bairro dos pescadores. Rotura a norte do esporão norte.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1996	Jan		Cortegaça	RLC; DDC	Rombos na defesa aderente e erosão acentuada na Praia Velha.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1996	Jan		Maceda	RLC; DDC	Regressão da praia adjacente ao esporão e rombos no esporão.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social

1996			Furadouro	DI; DDC	Danos na superestrutura da obra aderente norte do esporão centro e em muros e bancos da Avenida Marginal.	Valente (2015); Comunicação Social
1997	Dez		Esmoriz	GAL; DDC	Galgamento da obra aderente frontal e consequente instabilidade.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
1998	Dez		Furadouro	GAL; DDC	Rotura pontual na obra aderente a sul do esporão central e galgamentos a sul do último esporão (soterrado).	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2000	Dez		Furadouro	GAL; DCD	Destruição do cordão dunar a cerca de 1km a sul do Furadouro numa extensão de 70m. Galgamentos com entrada do mar até cerca de 50m.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2000	Dez		Torrão do Lameiro	DCD	Destruição das dunas primárias, sendo a zona mais afetada a que fica entre a praia do Torrão do Lameiro, onde o mar avançou mais de 10m, a 500m a sul do Furadouro.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Jan		Cortegaça	RLC	Recuo da linha de costa com o desaparecimento da areia na Praia Velha.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Fev		Esmoriz	GAL	Galgamentos na obra aderente a norte do esporão sul e inundações do bairro dos pescadores.	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Fev		Furadouro	RLC; GAL; DCD; DI; DDC	Inúmeros galgamentos das obras aderentes a norte e sul do esporão centro, originando o derrubamento do muro da superestrutura adjacente à Avenida Central. Galgamentos causaram inundações em zonas florestais a sul do Furadouro, com extensões na ordem das centenas de metros. Forte erosão a norte dos dois esporões e degradação do sistema dunar.	Valente (2015); CMO
2001	Fev		Torrão do Lameiro	DCD	Destruição das dunas primárias.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Mar		Cortegaça	RLC; DDC	Abertura de rombo na defesa aderente. Recuo da linha de costa com desaparecimento de areal junto ao apoio Miradouro.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Set		Esmoriz	GAL	Galgamentos na obra aderente junto ao parque de campismo.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2001	Set		Cortegaça	DDC	Deslizamentos e rombos pontuais nas obras longitudinais aderentes	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2002	Fev		Cortegaça	RLC	Recuo da linha de costa junto ao esporão sul (espraiamento chega a 4m dos edifícios).	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2002	Mar		Cortegaça	RLC; GAL; DDC	Arriba de erosão a sul e destruição da obra longitudinal aderente frontal.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2002	Jun		Cortegaça	RLC	Recuo da linha de costa a norte do esporão. A sul o areal apenas é visível em baixa-mar.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social
2003	Jan		Furadouro	GAL; DI; DDC	Destruição a norte de 40m do muro no tardoz da obra aderente, avançando cerca de 3m para a frente urbana. Subescavações na obra aderente a norte numa extensão de 80m. Galgamentos na zona central.	Coelho <i>et al.</i> (2014); Comunicação Social

2003	Out		Furadouro	GAL; DDC	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro e destruição da cabeça do esporão sul, juntamente com várias roturas pontuais.	Valente (2015)
2005	Ago		Esmoriz	DDC	Destaque e destruição da cabeça do esporão norte de Esmoriz.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2005	Ago		Cortegaça	DDC	Fragilidades nas obras aderentes.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2005	Ago		Furadouro	DDC	Completa destruição da cabeça do esporão central.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2005	Set		Furadouro	RLC; GAL	Recuo da linha de costa e galgamentos frequentes da obra aderente a sul.	Valente (2015)
2005	Nov	19	Esmoriz	GAL	Avanço do mar no Bairro Piscatório de Esmoriz.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2006	Jan		Furadouro	GAL	Galgamentos inundam a marginal.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2006	Nov		Maceda	DI	Aluimento dos acessos à praia.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2006	Dez		Esmoriz	DDC	Roturas nalguns pontos entre dois esporões em frente à lota.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2007	Fev	20	Esmoriz	DDC	Rotura da obra aderente entre o esporão norte de Esmoriz e o esporão norte de Cortegaça, na zona do Bairro Piscatório.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2007	Mar		Cortegaça	DI	Destruição do muro do parque de campismo.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2008	Fev		Esmoriz	DDC	Assentamentos e rombos em 4 locais na obra aderente devido à agitação marítima com ondulação de 4m de altura.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2008	Fev		Cortegaça	DDC	Danos na estrutura de defesa.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2008	Ago		Esmoriz	GAL; DDC	Galgamentos e instabilidade da obra longitudinal aderente.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2008	Ago		Cortegaça	GAL; DDC	Galgamentos e instabilidade da obra longitudinal aderente.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2008	Out		Cortegaça	DDC	Pontos de fragilidade na obra aderente.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2009	Out	7	Esmoriz	GAL	Galgamentos desde as 4h29 até às 9h45.	Pereira e Coelho (2011); CMOS
	Out	7	Furadouro	GAL	Galgamentos desde as 8h09 até às 19h50.	Pereira e Coelho (2011); CMOS
2009	Nov	15	Esmoriz	GAL	Galgamentos desde as 14h59 até às 21h30.	Pereira e Coelho (2011); CMOS
2010	Jan	12	Esmoriz	GAL	Galgamentos desde as 8h04 até às 13h30.	Pereira e Coelho (2011); CMOS
			Furadouro	GAL; DI	Danos na avenida marginal devido a galgamentos da obra aderente.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social

2010	Fev	18	Maceda	RLC; GAL	Avanço do mar na mata.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2010	Fev		Furadouro	RLC; GAL; DI	Galgamento das obras aderentes, causando danos na marginal. Erosão do areal em frente à obra.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2010	Out		Esmoriz	GAL	Galgamentos na marginal.	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
2010	Out		Furadouro	GAL; DI	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão central, causando rotura parcial do muro da marginal.	Pereira e Coelho (2011); Valente (2015); Comunicação Social
2010	Nov	9	Esmoriz	GAL; DI	Vagas de 6 a 7m com ventos de noroeste, em situação de marés vivas. Inundação do Bairro dos Pescadores durante a madrugada e tarde (preia-mar).	Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
			Furadouro	GAL	Vagas de 6 a 7m com ventos de Noroeste, em situação de marés vivas. Inundação das ruas da marginal durante a madrugada e tarde (preia-mar).	
2012	Dez	16	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos a sul do esporão centro, causando a destruição do passadiço da marginal e a projeção de detritos, cascalho e paralelos para as ruas.	Registos Fotográficos
2013	Jan		Furadouro	GAL; DI	Galgamentos frequentes da defesa aderente, com grande transporte de sedimentos para as estradas, principalmente na zona norte da Avenida Central. Destruição de envidraçados de alguns estabelecimentos.	Registos Fotográficos
2013	Jan	30	Furadouro	GAL; DI; DDC	Galgamentos com grande caudal. Calçada da marginal bastante destruída. Muitos detritos, paralelos, areia e cascalho nas ruas. Destruição da plataforma superior da obra aderente.	Registos Fotográficos
		31	Furadouro	GAL	Continuação da ocorrência de galgamentos, embora com caudais inferiores.	Registos Fotográficos
2013	Fev	11	Furadouro	GAL; DI	Acesso impedido em algumas ruas perto da marginal devido à ocorrência de galgamentos e projeção de gravilha e paralelos.	Registos Fotográficos
2013	Mar	1	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos a sul do esporão centro, causando a destruição do passadiço da marginal e a projeção de detritos, cascalho e paralelos para as ruas. Marginal com estrada bloqueada.	Registos Fotográficos
2013	Mar	8	Furadouro	DDC	Destruição parcial da superestrutura e patamar superior da obra aderente a sul do esporão centro.	Registos Fotográficos
2013	Mar	18	Furadouro	RLC; GAL; DI	Galgamentos na zona central e sul da obra aderente. Transporte considerável de areia para a via pública, cerca de 30cm de altura. Destruição do passadiço da marginal e projeção de paralelos para as ruas.	Registos Fotográficos

2013	Mar	29	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos frequentes causam inundação da marginal e de várias ruas adjacentes com cerca de 15cm de altura de água constante. Muita espuma na estrada. Danos em alguns estabelecimentos e viaturas.	Registos Fotográficos
		30	Furadouro	GAL; DI; DDC	Galgamentos na marginal e inundações em estabelecimentos comerciais e habitações, devido à combinação de maré cheia, mudança de lua, vento e chuva. Destruição dos muretes de proteção e dos passadiços da marginal.	DA
2013	Jun	30	Maceda	DI	Muitos destroços na praia em plena época balnear.	Registos Fotográficos
2013	Set	29	Maceda	RLC; DCD	Grande erosão na praia, com taludes com mais de 5m de altura.	Registos Fotográficos
2013	Nov	1	Maceda	RLC; DDC	Destruição da raiz do esporão a norte e do remate a sul.	Registos Fotográficos
2014	Jan	1	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos com grande caudal e projeções de mais de 6m de altura. Muitos detritos nas ruas.	Registos Fotográficos
		3	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos durante todo o dia.	Registos Fotográficos
		3	Maceda	RLC; DDC	Agravamento do estado de destruição da raiz do esporão a norte e a sul. Recuo da posição da linha de costa.	Registos Fotográficos
		4	Furadouro	GAL	Continuação da ocorrência de galgamentos, embora menos frequentes e com caudais inferiores.	Registos Fotográficos
		5	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos frequentes durante a noite com grande caudal. Inundação da marginal e das ruas adjacentes com cerca de 20cm de altura de água. Muita areia transportada para a via pública. Destruição dos passadiços a norte.	Registos Fotográficos
2014	Jan	8	Furadouro	DCD; DDC	Destruição do remate a sul da obra longitudinal aderente. Muitos destroços na zona Sul, com grande erosão do cordão dunar.	Registos Fotográficos
	Jan	9	Furadouro	DDC	Rotura pontual da obra longitudinal aderente, a Norte do esporão sul.	Registos Fotográficos
2014	Jan	29	Furadouro	RLC	Recuo de cerca de 5m na zona Norte, em relação à posição da linha de costa no início do mês.	Registos Fotográficos
2014	Fev	2	Furadouro	GAL; DI; DDC	Galgamentos na marginal com grande caudal durante a noite e o dia, original vagas de quase 1m de altura a descer as ruas adjacentes à marginal, projetando detritos, pedras e grandes quantidades de areia para a via pública. Danos em diversas viaturas, destruição completa de muretes e passadiços da zona pedonal e danos em montras de estabelecimentos comerciais, esplanadas e restaurantes. Inundações de ruas com altura de água de cerca de 20cm, afetando várias habitações. Grandes deslocamentos de blocos nas defesas aderentes, causando roturas pontuais. Prejuízos avultados.	DA; CMO; Registos Fotográficos

			Cortegaça	RLC; GAL; DCD; DI; 2 DDC	Galgamentos da defesa aderente, causando danos no patamar superior devido ao escoamento dos caudais galgados. Rotura do lado a norte da raiz do esporão e grande erosão no remate a sul. Recuo considerável da posição da linha de costa, na zona do parque de campismo, causando danos nas vedações.	CMO; Registos Fotográficos
			Maceda	RLC; DDC	Destruição da paliçada frontal de retenção do talude dunar, realizada em setembro/outubro de 2013. Redução significativa da largura de praia.	CMO; Registos Fotográficos
2014	Fev	15	Furadouro	GAL	Galgamentos pequenos durante a noite não causam inundação da via pública mas destroem a calçada da zona pedonal da marginal. Estradas cortadas.	Registos Fotográficos
		16	Furadouro	GAL	Galgamentos frequentes durante o dia, projetam muitas pedras para a marginal. Estradas cortadas.	Registos Fotográficos
2014	Fev	25	Furadouro	GAL	Galgamentos de caudal reduzido.	Registos Fotográficos
2014	Mar	2	Furadouro	RLC; GAL; DI; 2 DDC	Galgamentos com caudal considerável. Agravamento da situação estrutural da superestrutura da obra aderente, com a rotura do murete e da zona pedonal adjacente devido a infraescavações. Deslocamentos de blocos no manto resistente da obra longitudinal aderente a sul, com a ocorrência de duas roturas. Rotura do remate a norte da obra aderente a norte, devido a infra-escavações. Inundação de vários estabelecimentos e habitações.	DA; CMO; Registos Fotográficos
		2	Cortegaça	RLC; DCD; DI	Recuo considerável da posição da linha de costa, na zona do parque de campismo. Paramento dunar apresenta grande declive e instabilidade, existindo perigo de deslizamento de terras. Encontra-se já a poucos metros de distância do limite parque.	DA
		3	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos frequentes das obras aderentes durante a tarde, com caudal significativo. Inundação de estradas, estabelecimentos comerciais e habitações.	CMO; Registos Fotográficos
2014	Mar	7	Furadouro	DDC	Várias roturas pontuais nas obras aderentes.	Registos Fotográficos
2014	Mar	29	Furadouro	GAL	Galgamentos durante a noite.	Registos Fotográficos
2014	Out	9	Furadouro	GAL	Galgamentos na marginal.	Registos Fotográficos
2014	Out	16	Furadouro	GAL	Galgamentos na zona Sul da marginal.	Registos Fotográficos
2014	Out	25	Furadouro	GAL	Galgamentos na zona Sul da marginal.	Registos Fotográficos
2014	Nov	4	Furadouro	GAL	Galgamentos na zona Sul da marginal.	Registos Fotográficos
2015	Jan	20	Furadouro	GAL	Galgamentos na marginal durante a noite, causando a inundação de vários arruamentos.	Registos Fotográficos
		21	Furadouro	GAL	Galgamentos na marginal.	Registos Fotográficos

2015	Fev	20	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos frequentes na marginal durante a noite e a tarde, com caudal considerável. Inundação de ruas durante a noite, com cerca de 15cm de altura de água.	Registos Fotográficos
		21	Furadouro	GAL	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro.	
2015	Abr	19	Furadouro	GAL	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro.	Registos Fotográficos
2015	Set	16	Furadouro	GAL	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro.	Registos Fotográficos
2015	Out	27	Furadouro	GAL; DI	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro causam destruição de um bar da praia e de parte da calçada da marginal.	Registos Fotográficos
		28	Furadouro	GAL	Galgamentos da obra longitudinal aderente a sul do esporão centro.	Registos Fotográficos

ANEXO B – BASE DE DADOS DE INTERVENÇÕES

Na Tabela 17 apresenta-se a base de dados compilada de registos de intervenções costeiras realizadas nas praias do concelho de Ovar, referindo-se, quando disponível, o custo associado e a entidade responsável pela intervenção. Em conformidade com o que foi referido na secção 5.6.1, seriam-se as intervenções em diferentes categorias: construção (c) e reabilitação (r) de esporões, E, e obras longitudinais aderentes, OLA, reforço do cordão dunar (CD), alimentação artificial de praias (AAP) e outras intervenções de ordenamento e requalificação da marginal (Outras). Foram também identificadas as intervenções com carácter de emergência (IE).

Tabela 17 – Registos de intervenções realizadas na zona litoral de Ovar, entre 1958 e 2014, com os respetivos custos associados.

Data de adjudicação			Local	Tipo	Descrição	Valor [€]	Entidade	Referências
Ano	Mês	Dia						
1958			Furadouro	rOLA	Lançamento de pedra sobre pedra na frente-mar nas zonas mais afectadas pela erosão. Colocação de 100m de extensão de enrocamento no troço da Avenida Marginal entre o alto da Avenida Central e a Rua Álvares Cabral.	401,53	Direção dos Serviços Marítimos (Engº Lima Trovim)	Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Valente (2015)
1959			Furadouro	cOLA	Construção de obra longitudinal aderente com 300m de extensão.			EuroSION (2006); Pereira e Coelho (2011)
1969			Furadouro	rOLA; IE	Colocação de pedra na parte atingida pelas águas.			Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011)
1971			Furadouro	rOLA; 3cE	Colocação de pedra nos pontos mais atingidos. Construção de 3 esporões, com cerca de 200m de extensão cada e 350m de distância entre eles. Um esporão em frente ao Hotel Mar-e-Sol. Um esporão em frente à Rua do Comércio. Um esporão imediatamente a sul do centro Vidreiro. Construção de uma coroa junto a terra com 15m de largura que alarga até atingir os 22m na extremidade em contacto com o mar.	81280,85		Lamy (2001); Pereira e Coelho (2011); Valente (2015)
1972			Cortegaça	cE	Construção do esporão norte de Cortegaça, 170m.			EuroSION (2006); Pereira e Coelho (2011)
1977			Esmoriz	cOLA	Construção de obra aderente com 850m de extensão.			EuroSION (2006); Pereira e Coelho (2011)

1978		Esmoriz	cOLA	Construção de obra longitudinal aderente norte de Esmoriz (140 m).		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1981		Furadouro	cE	Construção do esporão sul do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1981		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1982		Cortegaça	rE	Obras no esporão norte de Cortegaça, 170m.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1982		Furadouro	cOLA	Construção de obra aderente (300m).		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1982		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1982		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1982		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1984		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1984		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1985		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1985		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1986		Furadouro	cE	Construção do esporão norte do Furadouro, 100m.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1986		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1986		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1987		Esmoriz	2cE	Construção do esporão norte de Esmoriz, 160m. Construção do esporão sul de Esmoriz, 180m.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1987		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1987		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1987		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)

1987		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1987		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1988		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1988		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1988		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1988		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1989		Maceda	cE	Construção de um esporão na Praia Velha de Maceda, 150m.		Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
1989		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
1989		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); Comunicação Social
1990		Cortegaça	cOLA	Construção de uma obra aderente em Cortegaça, 1000 m.		Eurosion (2006); Pereira e Coelho (2011)
1990		Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1990		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.		Pereira e Coelho (2011); INAG
1991		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul do Furadouro.		Pereira e Coelho (2011); INAG

1992			Esmoriz	rE; IE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.	20064,06		Pereira e Coelho (2011); INAG; CMO
			Esmoriz	rE; IE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.			
			Esmoriz	rOLA; IE				
1992			Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1992			Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1993			Esmoriz	cOLA; IE	Prolongamento da obra longitudinal aderente a sul do esporão sul de Esmoriz.	72883,01		Pereira e Coelho (2011); CMO
1994	Mar	14	Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção da obra longitudinal aderente de Cortegaça e respetivo prolongamento para proteção das escolas.	55549,03		Pereira e Coelho (2011); Valente (2015); INAG; CMO
1994	Set	30	Esmoriz	cOLA	Reconstrução e prolongamento da obra longitudinal aderente de Esmoriz sul.	180576,26		Valente (2015); CMO
	Out	31	Esmoriz	cOLA	Reconstrução e prolongamento da obra longitudinal aderente de Esmoriz sul.			
	Nov	30	Esmoriz	cOLA	Reconstrução e prolongamento da obra longitudinal aderente de Esmoriz sul.			
1995			Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1995			Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996			Esmoriz	Outra	Esforço suplementar financeiro.	4193,06	INAG	Valente (2015); INAG
			Cortegaça	Outra	Esforço suplementar financeiro.			
			Furadouro	Outra	Esforço suplementar financeiro.			
1996			Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG

1996		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente Sul de Esmoriz.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente norte de Esmoriz. Reparação de roturas pontuais e prolongamento para norte.	621084,17		Pereira e Coelho (2011); Valente (2015); INAG
		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça. Prolongamento até à obra aderente sul de Esmoriz.			
1996		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1996		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul do Furadouro.			Pereira e Coelho (2011); INAG
1997		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.	3600985,10	INAG	Pereira e Coelho (2011); INAG
		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.			
		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			
		Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.			
		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.			
		Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.			
		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.			
		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.			
		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente.			
		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.			
		Furadouro	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul do Furadouro.			

1998		Esmoriz	CDCD	Reabilitação do sistema dunar da praia de Esmoriz com cravação de estacaria.	1933,34		Valente (2015)
1999		Esmoriz	2rOLA; 2rE	Continuação dos trabalhos não concluídos nas empreitadas de 1997/1998.	1496394,98	INAG	Valente (2015); INAG
		Cortegaça	rOLA; rE	Continuação dos trabalhos não concluídos nas empreitadas de 1997/1998.			
		Furadouro	2rOLA; 2rE; CDCD	Continuação dos trabalhos não concluídos nas empreitadas de 1997/1998.			
1999		Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.	1945899,84	INAG	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; CMO
		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.			
		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.			
2001		Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			Pereira e Coelho (2011); INAG
2001		Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.	112558,73	INAG	Pereira e Coelho (2011); ARHC (2010); INAG; CMO
2001		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.	97041,13	INAG	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; CMO
2002		Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.	124174,00	INAG	Pereira e Coelho (2011); POVT; INAG; CMO
2002		Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.	258487,26	INAG	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; CMO
2002		Furadouro	Outra	Ordenamento de acessos da praia do Furadouro (primeira fase).	244221,42	CCDR Centro	Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); CMO
2003		Furadouro	rOLA; IE	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente norte do Furadouro.	71201,87	INAG	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; CMO
		Furadouro	rOLA; IE	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro do Furadouro.			
		Furadouro	rOLA; IE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.			
2005		Esmoriz	CD; CD; IE	Intervenção de emergência de correcção das dunas artificiais da Barrinha.	98414,80	CCDR Centro	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); INAG
2006		Esmoriz	Outra	Demolição do equipamento da Junta de Freguesia de Esmoriz.	11495,00	CCDR Centro	Coelho <i>et al.</i> (2014)

2007			Esmoriz	rOLA	Reforço da obra de obra aderente, danificada no dia 22 de Fevereiro. Estas obras foram terminadas em Março, tendo sido utilizadas rochas de 4 e 5t.			Pereira e Coelho (2011); INAG
2007			Esmoriz	Outra; IE	Intervenção de emergência e gestão da abertura da Barrinha.	30000,00	CCDR Centro	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); INAG
2008	Mai	14	Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Esmoriz.	5621610,36	INAG	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; POVT
			Esmoriz	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul de Esmoriz.			
			Cortegaça	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte de Cortegaça.			
			Maceda	rE	Intervenção de manutenção no esporão de São Pedro de Maceda.			
			Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão norte do Furadouro.			
			Furadouro	rE	Intervenção de manutenção no esporão sul do Furadouro.			
			Furadouro	rOLA				
			Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente norte de Esmoriz.			
			Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente centro de Esmoriz.			
			Esmoriz	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente sul de Esmoriz.			
			Cortegaça	rOLA	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente de Cortegaça.			
2008			Esmoriz	CDCD	Tapamento de rombo no dique norte e gestão do dique fusível da Barrinha.	18500,00	CCDR Centro	Coelho <i>et al.</i> (2014)
2009			Esmoriz	Outra	Colocação de areias e gestão do dique fusível da Barrinha.	44280,00	ARH Centro	ARHC (2009); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG
2009			Furadouro	rOLA; IE	Intervenção de manutenção na obra longitudinal aderente norte do Furadouro.	212688,96	ARH Centro	Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG; CMO
2009			Maceda	Outra	Limpeza da praia de Maceda.	7187,40	ARH Centro	ARHC (2009); Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015); INAG
2009			Furadouro	Outra	Fornecimento de madeira para passadiços na praia do Furadouro.	2240,00	CMO	Valente (2015)

2010			Esmoriz	Outra	Gestão da obra de ligação da Barrinha de Esmoriz ao mar. Reforço dos diques de construção da Barrinha.	22140,00	ARH Centro	ARHC (2009); ARHC (2010); Valente (2015)
2010			Furadouro	AAP	Recarga da praia.			Pereira e Coelho (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); INAG
2010			Furadouro	Outra	Requalificação ambiental da zona sul do Furadouro.	294518,58	ARH Centro	Coelho <i>et al.</i> (2014)
2010			Furadouro	Outra; IE	Projeto da intervenção de emergência em obra longitudinal aderente.	22478,00	ARH Centro	Valente (2015)
2010			Esmoriz	Outra	Serviços de limpeza balnear das praias.	6000,29	CMO	Valente (2015)
			Furadouro	Outra	Serviços de limpeza balnear das praias.			Valente (2015)
2010	Fev	19	Furadouro	Outra	Reforço da estabilidade do muro marginal da praia.	15300,00	ARH Centro	Valente (2015); CMO
2010	Mar	31	Furadouro	Outra; IE	Estabilização da proteção marginal da praia.	5500,00	ARH Centro	Valente (2015); CMO
2010	Mai	7	Furadouro	Outra; IE	Preparação da época balnear.	125937,00	ARH Centro	Valente (2015); CMO
2010	Nov	5	Furadouro	Outra	Reparação de passeios na frente mar do Furadouro.	4990,00	CMO	Valente (2015); CMO
2010	Dez		Furadouro	Outra	Requalificação ambiental da zona sul da praia.	239446,00	ARH Centro	ARHC (2010); ARHC (2011); CMO
2010	Dez		Furadouro	CDCD	Reposição dunar da zona sul da praia.	294518,58	ARH Centro	CMO
2010	Dez	27	Furadouro	cOLA	1ª fase da empreitada do prolongamento da obra longitudinal aderente.	380138,74	ARH Centro	ARHC (2011); CMO
2010	Jul	30	Furadouro	AAP; Outra; IE	Intervenção de emergência de obra da Avenida da Marginal do Furadouro, incluindo recarga da praia.	244221,42	ARH Centro	ARHC (2010); Valente (2015); CMO; POVT
2011			Esmoriz	Outra	Serviços de limpeza balnear das praias.	64380,00	CMO	Valente (2015)
			Cortegaça	Outra	Serviços de limpeza balnear das praias.			
			Furadouro	Outra	Serviços de limpeza balnear das praias.			
2011			Esmoriz	Outra	Requalificação dos passadiços de Esmoriz.	13677,60	ARH Centro	ARHC (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014)
2011			Esmoriz	Outra	Requalificação e limpeza dos passadiços na praia de Esmoriz.	20692,84	ARH Centro	Coelho <i>et al.</i> (2014)
2011			Furadouro	rOLA	Reforço e alargamento da obra longitudinal adjacente ao enraizamento norte do esporão E5.	167326,74	ARH Centro	ARHC (2011); Coelho <i>et al.</i> (2014); Valente (2015)
2011			Esmoriz	Outra	Gestão do dique da Barrinha de Esmoriz.	7500,00	ARH Centro	ARHC (2011)
2012	Mar	7	Furadouro	rOLA; IE	Intervenção de emergência para reabilitação de rombos na obra aderente entre os esporões norte e sul da praia do Furadouro.	103330,00	INAG	Valente (2015); CMO
2012	Ago	7	Furadouro	Outra	Repavimentação de arruamento a SW do Furadouro.	34300,00	CMO	Valente (2015); CMO

2012			Furadouro	Outra	Aquisição de serviços de pá de rastros para regularização do areal da praia.	3200,00	CMO	Valente (2015)
2012			Esmoriz	Outra	Fecho da Barrinha de Esmoriz e gestão do dique fusível durante a época balnear.	16242,50	ARH Centro	Valente (2015)
2012	Out	9	Furadouro	Outra	Substituição da guarda metálica no muro existente na frente de mar do Furadouro.	17175,50	CMO	Valente (2015); CMO
2013	Set	9	Furadouro	cOLA; CDCD	2ª fase da empreitada da proteção da marginal. Construção de uma estrutura longitudinal aderente, concluindo a obra costeira de toda a frente urbana, incluindo também a requalificação da proteção dunar a norte.	535034,38	APA	Valente (2015); CMO
2013	Set	9	Maceda	Outra	Criação de acessos, requalificação e ordenamento do parque de estacionamento e estabilização da frente de praia através da realização de paliçadas com pregação de estacas de madeira.	182953,28	APA	Valente (2015); CMO
2014			Esmoriz	rOLA; Outra	Ações de prevenção do risco da frente marítima urbana de Esmoriz.	74000,00	CMO	Valente (2015)
2014			Esmoriz	Outra	Reposição de areia na zona do dique provisório da Barrinha.	32522,58	CMO	Valente (2015)
2014			Esmoriz	Outra	Requalificação dos passadiços da praia de Esmoriz.	11120,00	ARH Centro	Valente (2015)
2014	Mar	3	Furadouro	rOLA; Outra; IE	Obras com carácter de emergência para proteção da marginal antes da preia-mar da tarde. Colocação de pedra 4 a 6t junto ao passadiço na parte sul da avenida, devido ao colapso do murete.	144049,08	CMO	Valente (2015); CMO; DA
2014	Mai	14	Esmoriz	3rOLA	Reabilitação de troços das obras aderentes.	972738,51	APA	APA (2014); Valente (2015)
			Cortegaça	rOLA	Reabilitação de troços das obras aderentes.			
			Furadouro	3rOLA	Reabilitação de troços das obras aderentes.			
2014	Jul		Cortegaça	cOLA; CDCD	Proteção e estabilização dunar. Construção de uma obra longitudinal aderente na zona sul, em frente ao parque de campismo.	926190,48	APA	APA (2014); Valente (2015); DA
2014	Jul		Furadouro	rOLA	Aumento da cota de coroamento na meia praia.	305261,45	CMO	APA (2014); Valente (2015)
2014	Jul		Furadouro	CDCD	Reforço da defesa dunar a norte, na frente urbana e a sul do Furadouro.	112837,00	CMO	APA (2014); Valente (2015)
2014	Jul		Cortegaça	rOLA	Aumento da cota de coroamento da obra aderente central e estrutura mergulhante a sul.	227248,10	CMO	APA (2014); Valente (2015)

ANEXO C – ÁREAS AFETADAS POR GALGAMENTOS NA ZONA URBANA DO FURADOURO

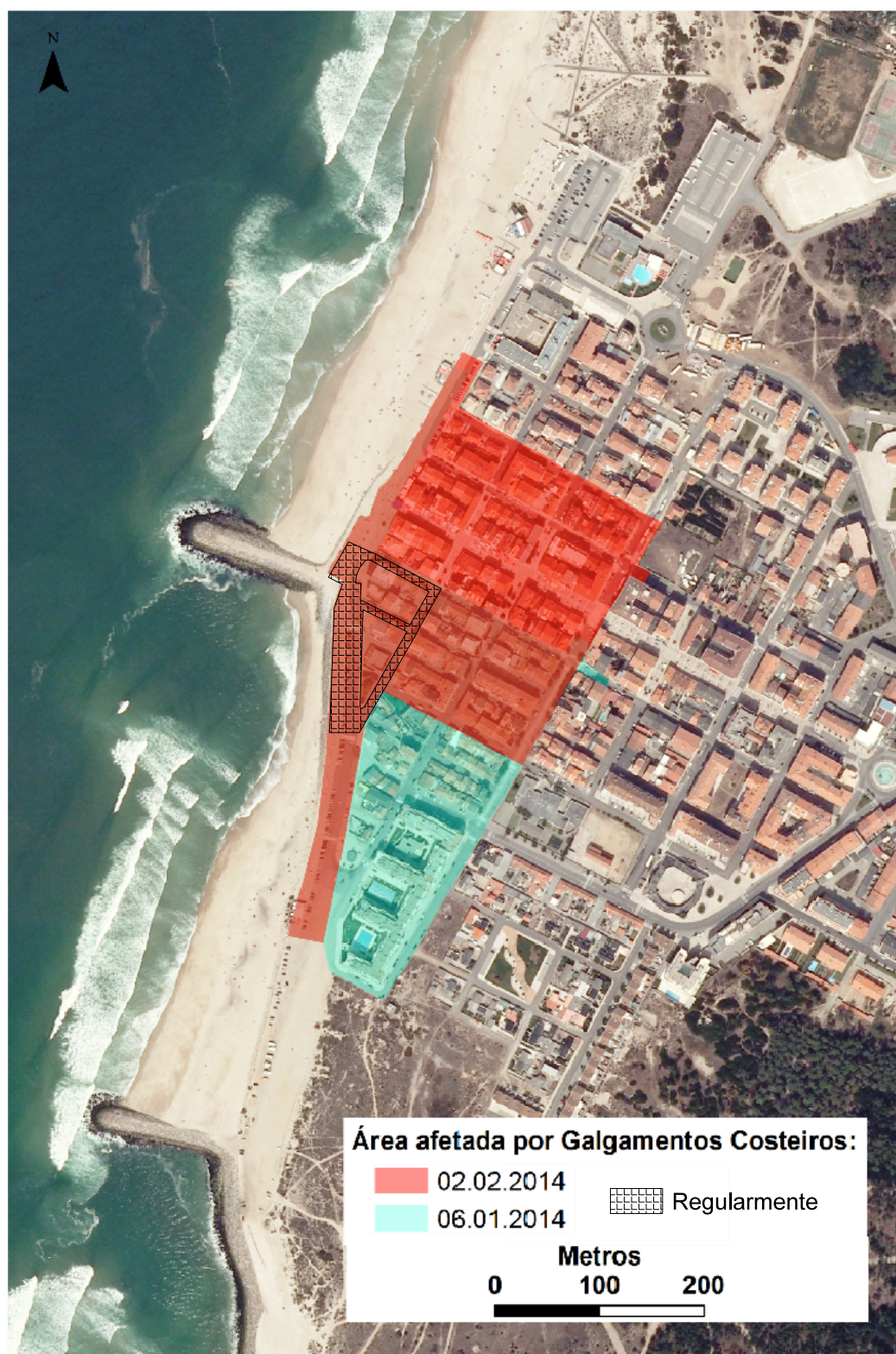


Figura 64 – Vista aérea das áreas afetadas por galgamentos das obras longitudinais aderentes na zona urbana do Furadouro (CMO, 2014).